

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Островерхов Евгений Владимирович

**ГЕНЕРАТОР ПРОТЯЖЁННЫХ ОБЪЁМНО-ОДНОРОДНЫХ
ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
ДЛЯ АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ**

Специальность 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Денисов В.В.

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Получение однородной плазмы в больших вакуумных объёмах	12
Выводы к главе 1	37
Глава 2. Генерация пучково-плазменных образований в сильноточном тлеющем разряде с полым катодом в осесимметричной системе с использованием двух инжекторов электронов	39
2.1 Методика и техника эксперимента	39
2.1.1 Описание экспериментальной установки.....	39
2.1.2 Характеристики ППО в сильноточном тлеющем разряде.....	43
2.1.3 Методика и оборудование для проведения зондовых измерений	48
2.1.4 Результаты зондовых измерений.....	50
2.2 Параметры пучково-плазменных образований в полом катоде с двумя инжекторами электронов.....	55
Выводы к главе 2	64
Глава 3. Сильноточный несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом с инжекцией электронов из протяженного цилиндрического эмиттера	66
3.1 Описание экспериментальной установки.....	66
3.2 Характеристики разряда в импульсном режиме горения.....	70
Выводы к главе 3	84
Глава 4. Генератор объёмно-однородных пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и его использование для азотирования сталей	86
4.1 Параметры и устройство генератора	86
4.2 Закономерности азотирования штамповой стали 4X5МФС	88
4.3 Азотирование изделий из штамповых сталей.....	94
4.4 Азотирование трубчатых изделий из нержавеющей стали	96
4.4.1 Методы и техника эксперимента.....	96

4.4.2 Результаты азотирования тонкостенных труб	97
Выводы к главе 4	101
Заключение	103
Список литературы	107
Приложение А	117
Значения концентрации плазмы N , см ⁻³	117
Приложение Б	120
Акты внедрения	120
Приложение В	123
Описание изобретения к патенту	123

Введение

Ионно-плазменные методы обработки поверхности металлов и сплавов (азотирование, активация поверхности, нанесение износостойких покрытий и пр.) широко применяются в современной промышленности [1, 2]. Ионно-плазменное азотирование поверхности крупногабаритных изделий из металлов и сплавов благодаря высокой экологичности более перспективно по сравнению с азотированием в расплавах солей, карбонитрированием и азотированием в газовых печах [3, 4]. В плазме классического аномального тлеющего разряда, наиболее широко применяемого в промышленности, при относительно высоких давлениях рабочего газа (100–1000 Па) энергия ионов, бомбардирующих обрабатываемое изделие, весьма мала и составляет величину до нескольких десятков электрон-вольт, что снижает технологические возможности при выборе оптимальных режимов азотирования изделий [5, 6]. Переход в область рабочих давлений ≈ 1 Па и ниже позволяет регулировать энергию бомбардирующих ионов, которая пропорциональна величине прикатодного падения потенциала и может составлять несколько сотен электрон-вольт. Однако создание плазменных систем на основе разрядов низкого давления, в которых возможна обработка крупногабаритных, в том числе протяженных, изделий имеет ряд сложностей. В частности, должны быть решены вопросы обеспечения низкой степени неоднородности распределения заряженных частиц по объему рабочей камеры, что необходимо для равномерной обработки поверхности материалов и изделий. Этим требованиям удовлетворяют плазменные системы на основе тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. Высокая однородность концентрации плазмы во многом обеспечивается многократным отражением электронов от стенок электростатической ловушки, которой является полый катод. При этом параметры разрядной системы подбираются таким образом, чтобы осциллирующие электроны тратили практически всю свою энергию в процессах генерации плазмы до ухода на анод. Необходимо отметить, что в самостоятельном тлеющем разряде с полым катодом при низком давлении требуемые для обработки значения плотности ионного тока

из плазмы на поверхность изделия обеспечиваются при напряжениях порядка 500–1000 В, что в условиях интенсивного травления стенок полого катода снижает возможности по обработке ряда материалов, особенно титана. Кратно снизить (вплоть до ≈ 50 В) напряжение горения тлеющего разряда и обеспечить широкий диапазон изменения плотности ионного тока, извлекаемого из плазмы, позволяет инжекция электронов из вспомогательного разряда в полый катод основного тлеющего разряда [7–9]. Однако инжекция электронов через сетчатый электрод, имеющий площадь на один-два порядка меньшую, чем площадь поверхности полого катода несамостоятельного тлеющего разряда создаёт неравномерность распределения концентрации заряженных частиц в объёме полого катода несамостоятельного тлеющего разряда. Ранее были предложены разные способы снижения неоднородности концентрации плазмы, в частности за счет независимой регулировки тока и напряжения горения тлеющего разряда, давления рабочего газа в вакуумной камере, а также за счет использования импульсно-периодического режима горения несамостоятельного тлеющего разряда с повышенной амплитудой тока разряда по сравнению со значением тока в стационарном режиме горения [10–12]. Тем не менее дальнейшее развитие методов генерирования пучково-плазменных образований (ППО)¹ большого объёма (более 0,1 м³) в газовых разрядах низкого давления, способов получения низкой степени неоднородности распределения концентрации плазмы, а также прогнозирования свойств таких ППО и их применения для азотирования сталей представляется актуальным.

Известным способом уменьшения степени неоднородности распределения концентрации плазмы в объёме полого катода несамостоятельного тлеющего разряда является использование двух и более инжекторов электронов. Применение нескольких инжекторов электронов позволяет снизить неоднородность, однако к

¹ Под ППО будем понимать такое плазменное образование, основные свойства (степень неоднородности распределения заряженных частиц, степень ионизации, состав плазмы и др.) и параметры которого (температура и концентрация заряженных частиц, потенциал плазмы), в основном определяются параметрами пучка инжектированных заряженных частиц (плотность тока, полная величина тока инжекции, кинетическая энергия частиц и проч.) с учетом, что созданы условия для максимально возможного расходования энергии инжектированных заряженных частиц на создание и поддержание данного плазменного образования.

настоящему времени остается неясным, каким образом можно спрогнозировать результирующее распределение концентрации заряженных частиц в ППО, генерируемом в системе с несколькими инжекторами электронов, и можно ли использовать для этого принцип суперпозиции. В данном случае под принципом суперпозиции понимается равенство экспериментально полученного распределения концентрации заряженных частиц в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда при совместной работе двух и более инжекторов электронов и арифметической суммы распределений концентрации плазмы, полученных при раздельной работе инжекторов электронов.

Использование принципа суперпозиции распределений концентрации плазмы, полученных при раздельной работе инжекторов электронов, не является очевидным, так как система на основе полого катода в определенных диапазонах рабочих параметров может быть нелинейна, в частности, из-за относительно высокой степени ионизации плазмы. С увеличением степени ионизации возрастает вероятность кулоновских столкновений заряженных частиц в ППО, что приводит к изменению распределения концентрации плазмы несамостоятельного тлеющего разряда в объёме полого катода.

В данной работе исследуется возможность применения принципа суперпозиции для прогнозирования распределения концентрации заряженных частиц в ППО, генерируемом в полом катоде сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с двумя инжекторами электронов. Также в данной работе предложено и исследовано перспективное техническое решение по использованию цилиндрического протяженного сетчатого плазменного эмиттера электронов, формирующего радиально расходящийся пучок электронов, инжектируемых в ППО основного тлеющего разряда. Инжектируемые из плазменного эмиттера электроны осциллируют в полом катоде, создавая плазму с контролируемыми параметрами.

Цель работы: разработка и исследование эффективных методов снижения степени неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в ППО,

генерируемых в сильноточном несамостоятельном тлеющем разряде при низком давлении рабочего газа и используемых для азотирования сталей.

Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих **задач**:

1. Выявление закономерностей генерации ППО в полой катоде несамостоятельного сильноточного тлеющего разряда низкого давления с двумя инжекторами электронов и проверка соблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц в ППО, полученных в полой катоде тлеющего разряда при раздельной работе инжекторов электронов, при токах тлеющего разряда до 200 А.

2. Выявление закономерностей генерации ППО в системе на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом и протяженным цилиндрическим полым сетчатым эмиттером, создающим радиально расходящийся пучок электронов, инжектируемых в полый катод тлеющего разряда.

3. Разработка и создание генератора протяженных ППО с двумя инжекторами электронов для практической реализации ионно-плазменного азотирования крупногабаритных протяженных изделий из металлов и сплавов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Определены условия применимости принципа суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц, полученных при раздельной работе двух источников электронов при впрыске из них электронов в плазменное образование тлеющего разряда.

2. Выявлены зависимости степени неоднородности продольного распределения концентрации плазмы в протяженном полой сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда от его диаметра, давления рабочего газа, напряжения горения тлеющего разряда при инжекции внутрь полого анода радиально сходящегося потока ионов из плазменного образования, формируемого основным сильноточным тлеющим разрядом с полым катодом.

Практическая значимость работы

1. Разработан и создан генератор объемно-однородных пучково-плазменных образований с объемом полого катода $0,34 \text{ м}^3$, используемый на практике для

ионно-плазменного азотирования изделий из конструкционных и инструментальных сталей, выпускаемых промышленностью.

2. Выявлены закономерности низкотемпературного азотирования конструкционных и инструментальных сталей (08X18H10, 4X5MФC, X12MФ, 40X, 38X2MЮА), которые позволили разработать технологические режимы ионно-плазменного азотирования ряда изделий.

3. Предложен и опробован способ упрочнения поверхностных слоёв тонкостенных, толщиной около 100 мкм, протяженных (до 300 мм) трубок диаметром около 0,5 мм из нержавеющей стали для изготовления игл медицинских катетеров с целью снижения величины прогиба готовых игл. Величина прогиба трубок после азотирования в оптимальном режиме обработки снизилась на 20% по сравнению с исходным образцом.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и обработки данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласием расчетных и экспериментально полученных результатов, а также практической реализацией выводов, сформулированных в диссертации.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В генераторах объемно-однородных пучково-плазменных образований, формируемых в полой катодной сильноточной 1–200 А тлеющего разряда низкого (около 1 Па) давления, поддерживаемого внешней инжекцией электронов из двух источников, при увеличении тока тлеющего разряда и, соответственно, концентрации заряженных частиц, степень несоблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации плазмы возрастает, что необходимо учитывать при прогнозировании результирующего распределения концентрации заряженных частиц.

2. Увеличение диаметра полого протяженного, длиной ≈ 1 м, цилиндрического сетчатого анода вспомогательного дугового разряда (эмиттера электронов) приводит к снижению степени неоднородности продольного

распределения концентрации заряженных частиц внутри него благодаря перераспределению плазмы, формируемой электронами дугового разряда и ионами из пучково-плазменного образования тлеющего разряда.

3. Созданный генератор протяженных пучково-плазменных образований позволяет в постоянном и импульсно-периодическом режимах в полном катоде объемом $0,34 \text{ м}^3$ в диапазоне давлений $(0,2-1) \text{ Па}$ при токах разряда до 350 А и напряжениях горения до 300 В при средней мощности в разряде до 25 кВт создавать плазму с концентрацией около 10^{18} м^{-3} с продольной степенью неоднородности концентрации заряженных частиц не более $\pm 25\%$ для азотирования изделий из конструкционных и инструментальных сталей высотой до 800 мм , диаметром до 350 мм и массой до 150 кг .

4. Объемно-однородные пучково-плазменные образования, генерируемые в импульсно-периодическом режиме горения сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении, обеспечивают низкотемпературное (до $430 \text{ }^\circ\text{C}$) азотирование протяженных (длиной до 300 мм) тонкостенных трубок из нержавеющей стали 08X18H10 на глубину до нескольких микрон с низкой степенью неоднородности глубины азотированного слоя по длине изделий.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. По результатам работы получен 1 патент РФ на изобретение.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 25-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2018); XXIV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ – 24), (г. Томск); XII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (г. Казань, 2020); 15-я Международная научная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ – 2023 г.),

(г. Минск, Беларусь); I Всероссийская конференция с международным участием «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (GDP NANO), (г. Казань, 2020); International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP-2017, г. Новосибирск), GDP-2019 (г. Томск), GDP-2021 (г. Екатеринбург), GDPA-2023 (г. Уфа); International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2018, г. Томск), EFRE-2020 (г. Томск).

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие научную новизну, практическую ценность и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Автором разработаны и апробированы конструкции отдельных узлов генератора плазмы, собрана и введена в эксплуатацию экспериментальная установка с двумя инжекторами электронов, а также генератор с протяженным полым сетчатым эмиттером радиально расходящегося потока электронов. Все эксперименты и анализ полученных в ходе экспериментов результатов проводились автором лично. В постановке задач исследований и обсуждении полученных результатов активное участие принимали научный руководитель кандидат технических наук В.В. Денисов, а также доктор технических наук Н.Н. Коваль, доктор физ.-мат. наук Т.В. Коваль и С.С. Ковальский.

Структура и краткий обзор работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа имеет общий объем 123 страницы и содержит 74 иллюстрации, 21 таблиц, список литературы из 110 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость работы, приведена структура диссертации и выносимые на защиту научные положения.

Первая глава представляет собой обзор литературы по проблематике создания однородной по концентрации плазмы в больших вакуумных объемах. Рассмотрены ряд электродных систем на основе разрядов низкого давления, которые применялись в различных электрофизических установках для генерации плазменных образований с целью решения широкого спектра задач. Приведены

также и результаты численного моделирования систем на основе тлеющего разряда с полым катодом, полученные различными исследователями. В завершение главы делается вывод о перспективности использования несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом для генерации однородных плазменных образований в больших вакуумных объёмах, а также о форме и конфигурации электродной системы.

Во второй главе описывается разработанный генератор пучково-плазменных образований на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом большой площади с впрыском электронов из двух инжекторов при низком давлении рабочего газа. Приводятся результаты исследования разработанной системы, описываются особенности формирования объёмно-однородных плазменных образований в сильноточном несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления.

В третьей главе описывается генератор протяженных пучково-плазменных образований, поддерживаемых радиально расходящимся потоком электронов, инжектируемых из протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера. Исследованы факторы, влияющие на продольные распределения концентрации заряженных частиц, как в протяженном плазменном эмиттере электронов на основе дугового разряда низкого давления, так и в полном катоде несамостоятельного тлеющего разряда.

В четвёртой главе приводятся описание генератора объёмно-однородных пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и результаты азотирования сталей, полученные с его использованием. Описаны закономерности азотирования штамповой стали 4X5МФС, а также тонкостенных стальных труб для игл медицинских катетеров.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, перспективы и рекомендации по их использованию, количество опубликованных статей и наименования журналов, в которых напечатаны работы автора.

Глава 1. Получение однородной плазмы в больших вакуумных объёмах

Получение низкотемпературной плазмы с малой, до нескольких десятков процентов, степенью неоднородности для обработки поверхности изделий в больших вакуумных объёмах (более $0,1 \text{ м}^3$) связано с рядом трудностей. В зависимости от электродной схемы, типа и параметров разряда имеется свой ряд особенностей генерации плазмы, как, например, относительно малая длина свободного пробега заряженных частиц в форвакуумной области давлений, относительно малая концентрация плазмы при низком давлении. Возникают также ситуации, когда при увеличении концентрации плазмы возможно контрагирование разряда, а при создании условий, увеличивающих длину свободного пробега заряженных частиц, появляется проблема быстрого ухода их на соответствующий электрод в энергетичном состоянии, в результате чего эффективность генерации плазмы снижается [13–17].

Необходимость создания объемно-однородных плазменных образований возникает в процессе решения различных научных задач, таких как получение широкоапертурных электронных и ионных пучков, ионно-плазменная обработка поверхности изделий из металлов и сплавов (нагрев, очистка, травление, активация поверхности, азотирование, напыление покрытий). Различные научные коллективы для создания плазмы с низкой степенью неоднородности используют различные типы и конфигурации разрядных систем. Системы генерации объемно-однородных плазменных образований в больших вакуумных объёмах, предназначенные для ионно-плазменной обработки крупногабаритных протяженных изделий, должны обеспечивать выполнение ряда параметров: низкая степень неоднородности (не более $\pm 30\%$) концентрации заряженных частиц или плотности потока извлекаемых из плазмы заряженных частиц, что влияет на однородность обработки поверхности образцов и изделий; относительно высокие значения концентрации заряженных частиц и, соответственно, плотности потока заряженных частиц извлекаемых из образования, так как этот параметр

существенно влияет как на качество, так и на скорость обработки изделия, то есть достижение необходимого результата.

Ниже представлен обзор ряда работ последних десятилетий, посвященных решению задачи генерации плазменных образований в больших вакуумных объемах для создания плазменных эмиттеров электронов, ионов и плазмы, а также технологического использования для модификации и упрочнения различных материалов и веществ.

В работе [18] исследовалась система генерации плазмы на основе трех дуговых источников электронов, предназначенная для формирования и ускорения широкоапертурного пучка электронов. На рисунке 1.1 представлена схема экспериментальной установки, в которой импульсный дуговой разряд, инициированный разрядом Пеннинга, возбуждается между электродами 1 и 3, 4, 5.

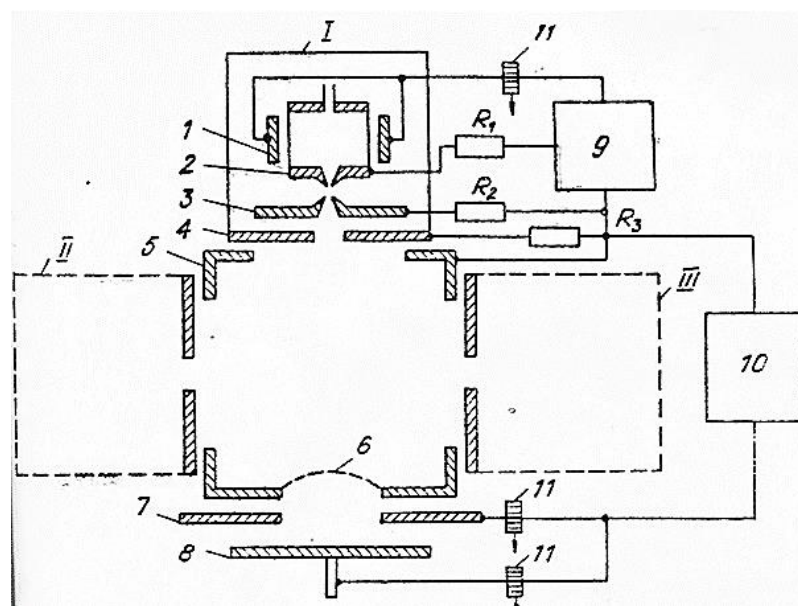


Рисунок 1.1 – Схема электронного источника с сетчатым плазменным эмиттером для генерирования пучка с высокой плотностью тока [18]: I, II, III – газоразрядные камеры; 1 – катоды; 2 – анод ячейки Пеннинга; 3 – промежуточный электрод-вставка; 4 – анод газоразрядной камеры; 5 – полый анод; 6 – сетка; 7 – ускоряющий электрод; 8 – коллектор; 9 – блок питания разряда; 10 – источник ускоряющего напряжения; 11 – пояс Роговского

Электроды 1, 2, 3, 4 собраны в единый узел и представляют собой газоразрядную камеру. Разряд контрагируется каналом диаметром 2 мм и длиной 2 мм в промежуточном аноде 2 и горит через соосные с каналом контрагирования отверстия диаметром 2 мм в электроде 3 и диаметром 20 мм в электроде 4 на

внутреннюю поверхность полого цилиндрического анода 5. В торце полого анода 5 диаметром 160 мм и длиной 180 мм имеется эмиссионное отверстие диаметром 50 мм, перекрытое плоской или вогнутой внутрь полости мелкоструктурной сеткой 6. Ускоряющий электрод 7 представляет собой диафрагму с отверстием, равным эмиссионному отверстию, и располагается на расстоянии 5 мм от сетки. За ускоряющим электродом находится коллектор 8.

При диаметре пучка 50 мм, геометрической прозрачности сетки 70%, ускоряющем напряжении 20 кВ был получен ток пучка 150 А с плотностью тока 10–12 А/см². Полученная степень неравномерности распределения плотности тока по сечению пучка не превышала 10% и обусловлена относительно небольшим объёмом газоразрядной камеры (~ 0,09 м³), что ограничивает область применения данной системы.

Большую площадь извлечения заряженных частиц удалось получить с применением аналогичных газоразрядных камер [18]. На рисунке 1.2 показана блок-схема экспериментальной установки с сетчатым плазменным эмиттером (СПЭ) с поперечным извлечением электронов.

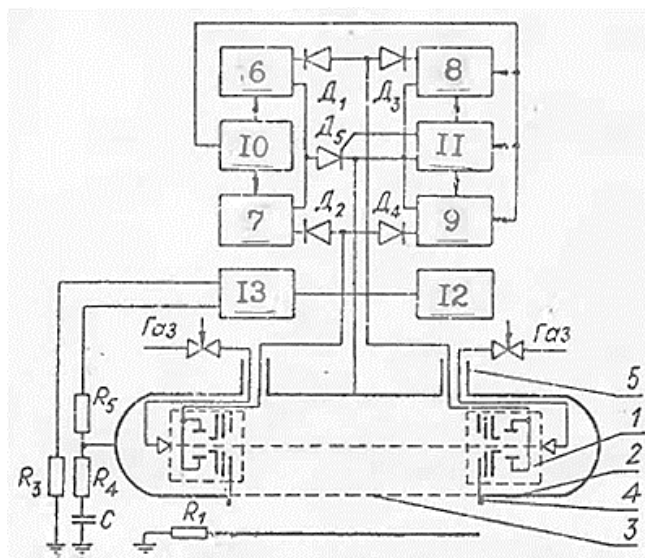


Рисунок 1.2 – Блок-схема электрического питания и конструкция СПЭ с поперечным извлечением электронов [18]:
 1 – газоразрядная камера; 2 – экран; 3 – сетка; 4 – полый анод; 5 – токоввод;
 6, 7 – формирующие линии; 8, 9 – генераторы поджигающий импульсов;
 10 – разделительный трансформатор; 11 – задающий генератор;
 12 – высоковольтный выпрямитель; 13 – емкостная батарея

Газоразрядные камеры 1 располагались на расстоянии 200 мм друг от друга на торцах полого анода 4, имеющего форму прямоугольно параллелепипеда с размерами 100×200×800 мм. На боковой стороне полого анода расположено эмиссионное окно с размерами 150×600 мм, которое перекрывалось мелкоструктурной сеткой 3 с размерами ячеек 0,4×0,4 мм.

При работе с частотой следования импульсов 25 с^{-1} и ускоряющим напряжением 250 кВ источник обеспечивал пучок с длительностью импульса 30 мкс и током 40 А. Неравномерность плотности тока по сечению пучка, измеренная в вакууме перед фольгой, была не хуже 10% от среднего значения.

Электродная схема ускорителя [19] отличается от предыдущей тем, что авторы разработали источник с радиально расходящимся пучком и тем самым увеличили площадь эмиссии на 70%.

Ускоритель с радиально расходящимся пучком (рисунок 1.3) состоит из двух цилиндрических камер 1 и 2 диаметром 500 мм и общей высотой 1700 мм, на оси которых установлены сетчатый плазменный эмиттер 3 с блоком питания разряда 4 и генератор импульсного напряжения питания 5 (ГНИ). Цилиндрическая камера 1 перфорирована для вывода пучка в газ отверстиями диаметром 20 мм и закрыта с наружной стороны Al-Mg-фольгой толщиной 50 мкм. Плазменный эмиттер состоит из полого анода 7, на торцах которого с помощью изолятора 8 соосно установлены холодные катоды 9 и поджигающие электроды 10. Полый анод 7 представляет собой цилиндр с закрытыми торцами диаметром 330 мм и высотой 1000 мм, боковая поверхность которого перфорирована на длине 800 мм и перекрыта сеткой. Объем формируемой эмиссионной плазмы составляет около $8,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

При диаметре цилиндра 500 мм и высоте 800 мм площадь сечения пучка за фольгой составляет $1,25 \text{ м}^2$.

На рисунке 1.4 представлено продольное распределение плотности тока электронного пучка за фольгой выводного окна цилиндрической камеры 1.

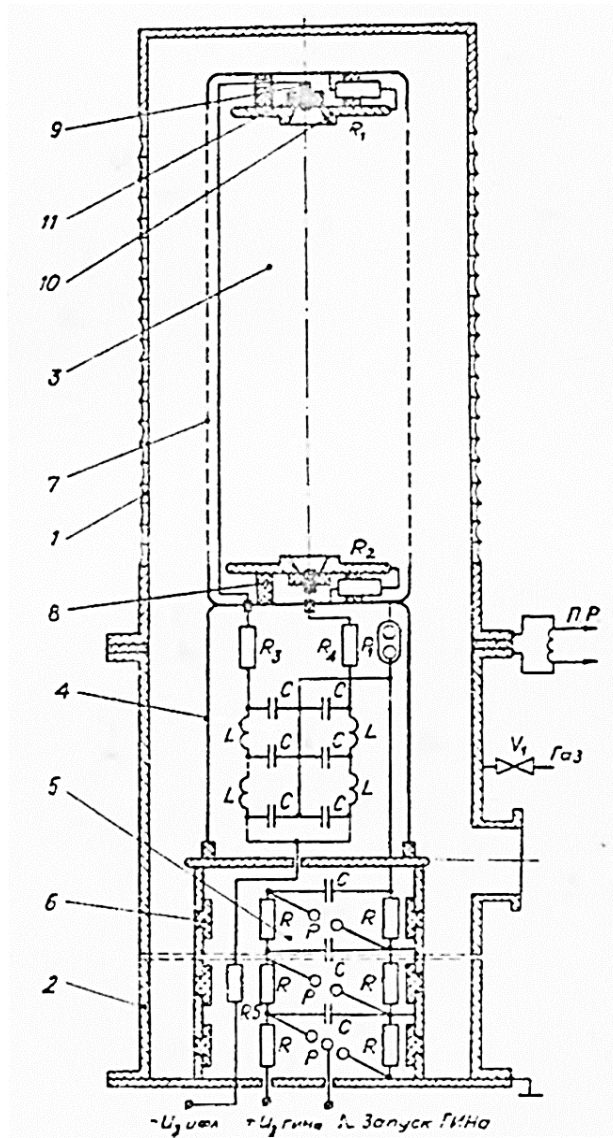


Рисунок 1.3 – Устройство и схема питания ускорителя, генерирующего радиально расходящийся пучок [19]: 1 и 2 – цилиндрическая камера; 3 – эмиттер; 4 – блок питания разряда; 5 – ГНИ; 6 – изолирующие кольца; 7 – полый анод; 8 – изолятор; 9 – катод плазмогенератора; 10 – поджигающий электрод; 11 – изолирующая шайба

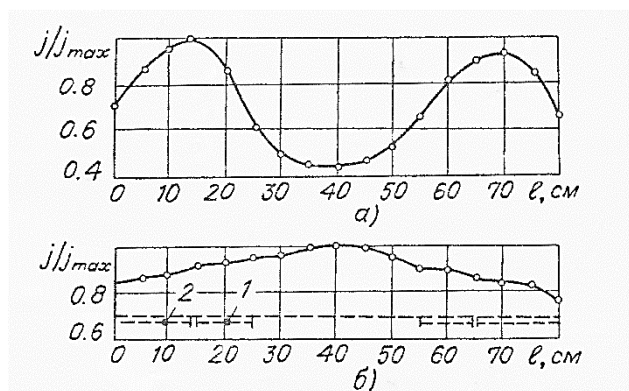


Рисунок 1.4 – Распределение плотности тока по сечению пучка за фольгой [19]: а – сетка с ячейками $0,8 \times 0,8 \text{ мм}^2$; б – на ту же сетку наложены сетки с ячейками $5 \times 5 \text{ мм}^2$ (1) и $3 \times 3 \text{ мм}^2$ (2)

Распределение плотности тока (рисунок 1.4,*а*) соответствует случаю, когда сетка эмиссионного окна с размерами ячейки $0,8 \times 0,8$ мм имела постоянную геометрическую прозрачность по всей площади. На рисунке 1.4,*б* представлено распределение плотности тока, когда на основную сетку в области повышенной плотности эмиссионного тока были наложены сетка 1 и сетка 2 с размерами ячеек 5×5 мм и 3×3 мм. Введение дополнительных сеток приводит к перераспределению плотности тока по поверхности эмиссионного окна, не изменяя при этом эффективности извлечения электронов. При токе 100 А и плотности тока $0,1$ А/см² неравномерность плотности тока по сечению пучка составила $\sim 10\%$, что также говорит и об относительно низкой степени неоднородности дуговой плазмы в полом аноде плазменного эмиттера источника электронов.

В электродной системе, представленной на рисунке 1.5, аналогичным образом инжекция электронов производится из протяженного цилиндрического эмиттера. Отличительной особенностью является то, что в качестве первой ступени используется самонакаливаемый полый катод, а инжекция электронов производится из плазмы тлеющего разряда [20–26]. Тлеющий разряд зажигался между полым катодом 1 и полым анодом 7 диаметром и длиной 150 мм, катод 1 разогревался и переходил в термоэмиссионный режим. Затем между полым анодом и разрядной камерой 9 подавалось ускоряющее напряжение. В зависимости от требований конструкция разрядной системы позволяла извлекать электроны как с торца полого анода 7, так и с боковой поверхности. Электронный пучок формировался в двойном слое пространственного заряда в ячейках металлической сетки а, которая располагалась на торце полого анода, и сетки б, которая располагалась на поверхности полого анода. Плоский 8 и цилиндрический 9 коллекторные электроды, на которые подавался ускоряющий потенциал, были установлены на расстоянии 10–12 см от сетки. В промежутке сетка–цилиндрический коллектор установлены три стержневых анода 10 диаметром 8 мм и длиной 100 мм, к которым прикладывался ускоряющий потенциал в том случае, если потенциал коллектора требовалось варьировать.

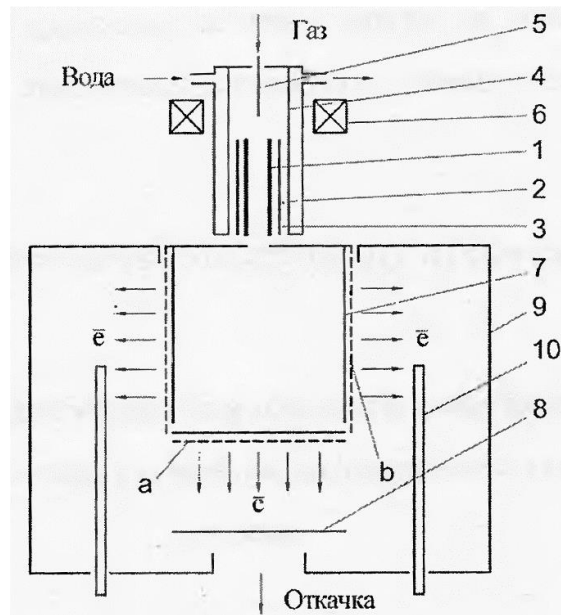


Рисунок 1.5 – Конструкция разрядной системы [20]:

- 1 – полый катод; 2 – водоохлаждаемый корпус; 3 – тепловой экран;
 4 – катод вспомогательного разряда; 5 – поджигающий электрод;
 6 – кольцевой магнит; 7 – полый анод; 8 – коллектор цилиндрического пучка;
 9 – коллектор радиально-расходящегося пучка (разрядная камера);
 10 – стержневые аноды; а – положение сетки при продольном
 извлечении электронов; б – положение сетки
 при поперечном извлечении электронов

При значении напряжения смещения коллектора 9 минус 250 В площадью $0,18 \text{ м}^2$ относительно плазмы плотность ионного тока на коллектор превышает 1 А/м^2 . Объем технологической плазмы, формируемой в разрядной камере, составляет около $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

На основе генераторов объемной низкотемпературной газовой и металлической плазмы создан ряд исследовательских и технологических установок для обработки поверхности материалов и изделий. Известна вакуумно-плазменная установка «Спрут» [27], диаметр которой составляет 1200 мм, а высота 600 мм (рисунок 1.6). Установка предназначена для ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий на изделия из металлов и сплавов. На цилиндрической поверхности камеры 1 располагались друг против друга два плазменных источника с накаливаемым и полым катодами (ПИНК) 2, два дуговых испарителя 7 и четыре магнетрона. Стенки вакуумной камеры 1 являлись анодом для всех электродных систем. За счет конфигурации электродной системы в объеме вакуумной камеры было получено плазменное образование с высокой однородностью.

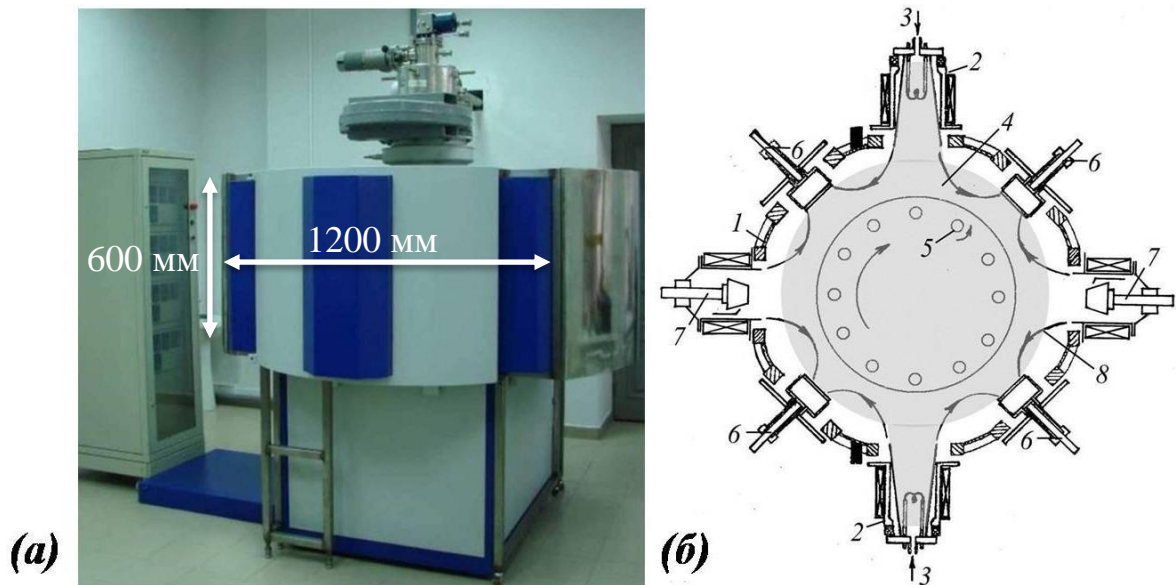


Рисунок 1.6 – Общий вид (а) и структурная схема (б) установки «СПРУТ» [27]:

- 1 – вакуумная камера; 2 – катодные узлы генератора газоразрядной плазмы;
 3 – напуск рабочего газа; 4 – объёмная плазма; 5 – обрабатываемые изделия;
 6 – магнетронно-распылительные системы; 7 – электродуговые испарители;
 8 – линии замкнутого магнитного поля («магнитная стенка»)

На рисунке 1.7 представлено распределение плотности ионного тока на зонд в относительных единицах.

Полученная в данных измерениях зависимость демонстрирует, что в центральном поперечном сечении вакуумной камеры в центральной его области (вблизи оси) размером 200 мм (от -100 до 100 мм) неоднородность распределения плазмы составляет не более $\pm 2\%$ от среднего значения. В центральной области этого сечения размером 400 мм (от -200 до 200 мм) неоднородность распределения составляет уже $\pm 4\%$ от среднего значения, в области размером 600 мм эта неоднородность равна $\pm 7,5\%$, а при размере области поперечного сечения плазменного образования 800 мм достигает $\pm 12\%$ от среднего значения.

Более равномерное распределение плазмы можно получить в полой катодной тлеющей разрядке благодаря многократным отражениям электронов от потенциального барьера (электростатическая ловушка).

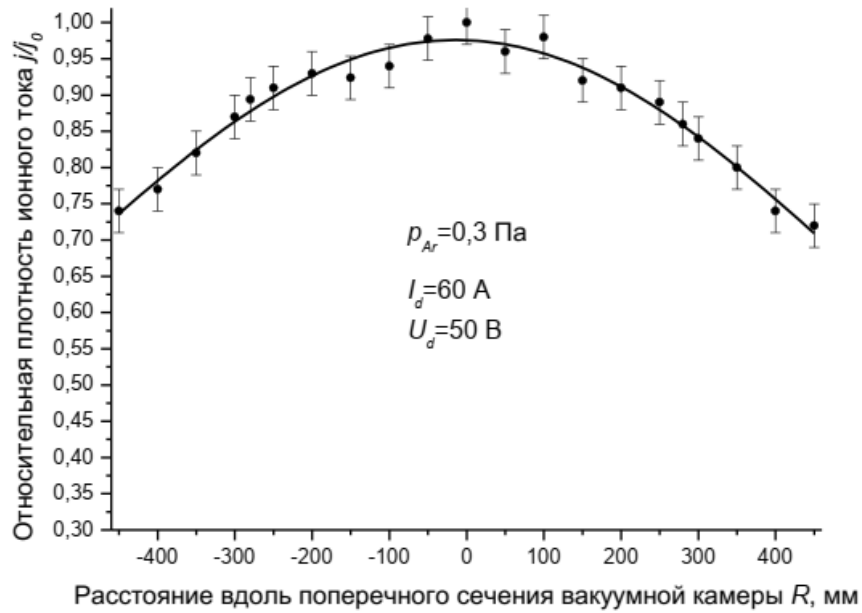


Рисунок 1.7 – Распределение плотности ионного тока насыщения зонда вдоль поперечной оси вакуумной камеры установки «СПРУТ» при токе разряда плазмогенератора $I_d = 60$ А, напряжении его горения $U_d = 50$ В и давлении аргона $P_{Ar} = 0,3$ Па [27]

В работах [28–32] приведены результаты исследований А.С. Метеля с коллегами в области получения объёмно-однородной плазмы самостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. Исследуются факторы, определяющие нижнюю границу рабочего диапазона давлений p_0 самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и делаются выводы от том, что величина p_0 прямо пропорциональна отношению $\eta = S_a/S_k$, где S_a – площадь анода; S_k – площадь катода. При таком соотношении тлеющий разряд стабильно горит при давлении порядка 10^{-2} Па. Также было показано, что при $\eta < \sqrt{m/M}$, где m и M – массы электрона и иона рабочего газа, образуется двойной слой возле катода с падением потенциала, превышающим потенциал ионизации рабочего газа.

На рисунке 1.8 показана схема экспериментальной установки. Тлеющий разряд зажигался в постоянном режиме между вакуумной камерой 1 диаметром и высотой 500 мм, которая являлась катодом самостоятельного тлеющего разряда 1, и анодом 5. При оптимальных соотношениях площадей катода и анода тлеющего разряда и давлении рабочего газа азота порядка 0,4 Па, напряжении 400 В, токе тлеющего разряда около 10 А в объёме 0,1 м³ при средней плотности тока 1,37 А/м²

удалось получить неоднородность концентрации плазмы ~ 20%. Объем разрядной камеры составлял около 0,1 м³.

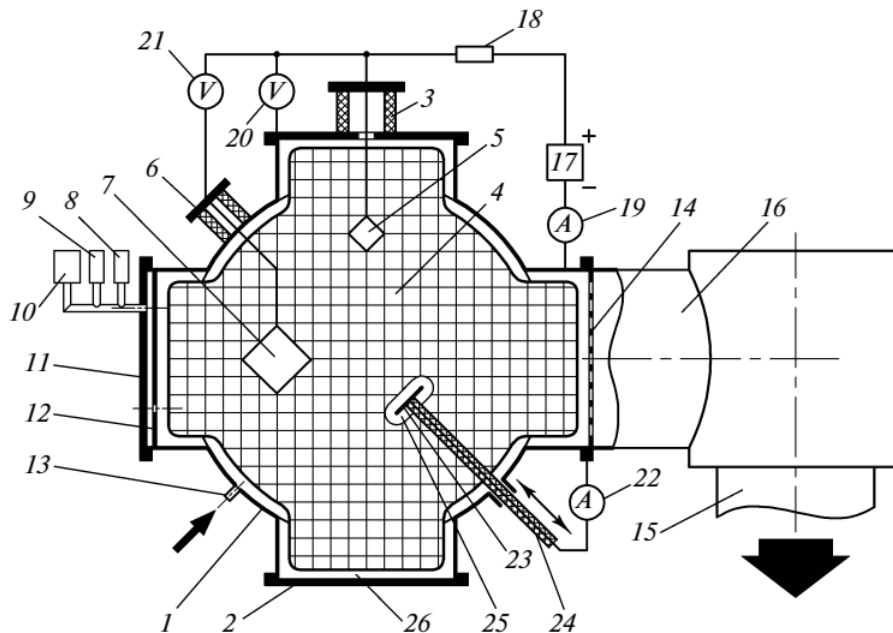


Рисунок 1.8 – Схема экспериментальной установки [28]: 1 – вакуумная камера; 2 и 11 – фланцы; 3 и 6 – вводы напряжения; 4 – плазма; 5 – анод; 7 – электрод; 8 – датчик ПМИ-2; 9 – датчик ПМИ-51; 10 – датчик давления BARATRON; 12 – диск с отверстиями; 13 – штуцер подачи газа; 14 – сетка; 15 – диффузионный насос; 16 – шиберная камера; 17 – источник электропитания; 18 – балластный резистор; 19 – амперметр; 20 – киловольтметр; 21 – вольтметр; 22 – миллиамперметр; 23 – диск; 24 – керамическая трубка; 25 и 26 – слои положительного объемного заряда

Самостоятельный тлеющий разряд за счет простоты электродной конструкции и рациональной системы электропитания весьма выгоден для создания объемно-однородной плазмы в больших вакуумных объемах и ионно-плазменной обработки изделий из металлов и сплавов. Однако высокое напряжение горения самостоятельного тлеющего разряда, приводящее к распылению стенок камеры и обрабатываемых изделий, узкий диапазон рабочего давления, относительно небольшие плотности тока сужают область технологического использования плазмы самостоятельного тлеющего разряда.

Авторы работы [33] при более высоком напряжении горения тлеющего разряда, но в большем объеме (около 0,25 м³) вакуумной камеры получили более высокие значения плотности ионного тока тлеющего разряда. Самостоятельный тлеющий разряд зажигался между трубчатым водоохлаждаемым анодом площадью

от 200 до 500 см² и стенками вакуумной камеры площадью 2 м², которые выполняли функцию полого катода (рисунок 1.9). При давлении 0,6 Па и напряжении горения разряда 700 В ток в разряде составлял 35 А, при этом плотность ионного тока на зонд составила 13,5 А/м².

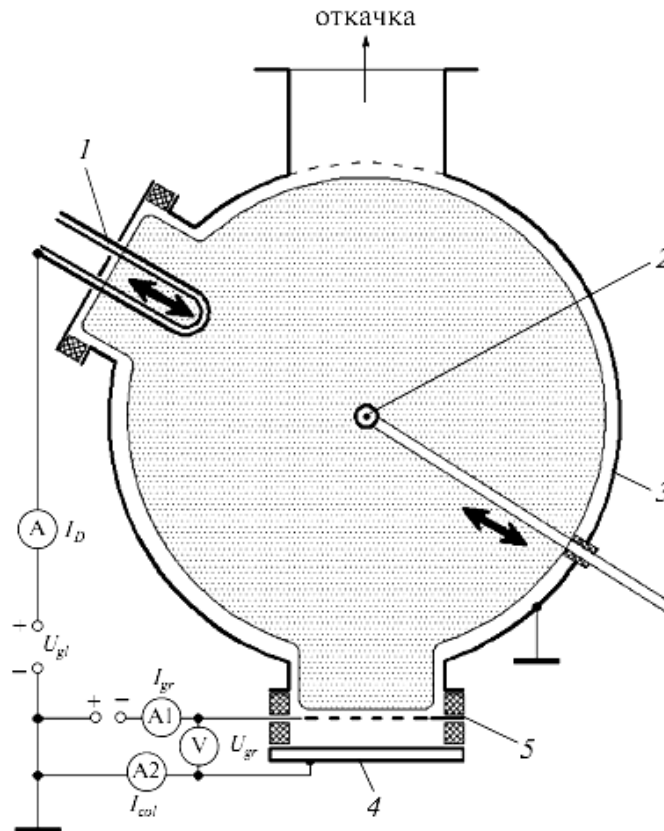


Рисунок 1.9 – Схема экспериментальной установки [33]:
1 – водоохлаждаемый трубчатый анод; 2 – цилиндрический зонд Ленгмюра;
3 – полый водоохлаждаемый катод-камера; 4 – коллектор; 5 – сетка

Для снижения рабочего давления и напряжения горения тлеющего разряда с полым катодом на порядок величины вплоть до 10^{-3} Па было предложено использовать инжекцию электронов в плазму тлеющего разряда. В работе [7] авторы определили ряд зависимостей: зависимости зажигания тлеющего разряда с инжекцией электронов от давления; зависимость напряжения горения тлеющего разряда от коэффициента несамостоятельности (I_a/I , где I_a – ток вспомогательного разряда; I – ток тлеющего разряда); зависимость рабочего давления от коэффициента несамостоятельности разряда; зависимость напряжения горения тлеющего разряда от площади анода. В работе делается вывод о том, что

зависимость давления от коэффициента несамостоятельности может быть представлена в виде

$$p = \frac{kT}{\sigma_i L} (\gamma + I_a/I)^{-1}, \quad (1.1)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура газа в катодной полости; σ_i – усредненное по энергии электронов сечение ионизации газа электронным ударом; L – длина пробега ускоренных в катодном слое электронов; γ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии.

Результаты цикла исследований систем с инжекцией электронов через эмиссионный электрод представлены в работах [34–38]. На рисунке 1.10 показан экспериментальный макет разрядной системы, в которой инжекция электронов осуществляется из двух разрядных ячеек на основе самостоятельного тлеющего разряда. Основной тлеющий разряд с полым катодом с инжекцией электронов зажигался между анодом 5 и полым катодом 1 диаметром 28 см и длиной 50 см. На торцах полого катода 1 расположены отверстия, перекрытые сеткой. Через эти отверстия производилась инжекция электронов из вспомогательного тлеющего разряда с полым катодом 3 в полый катод 1 основного тлеющего разряда.

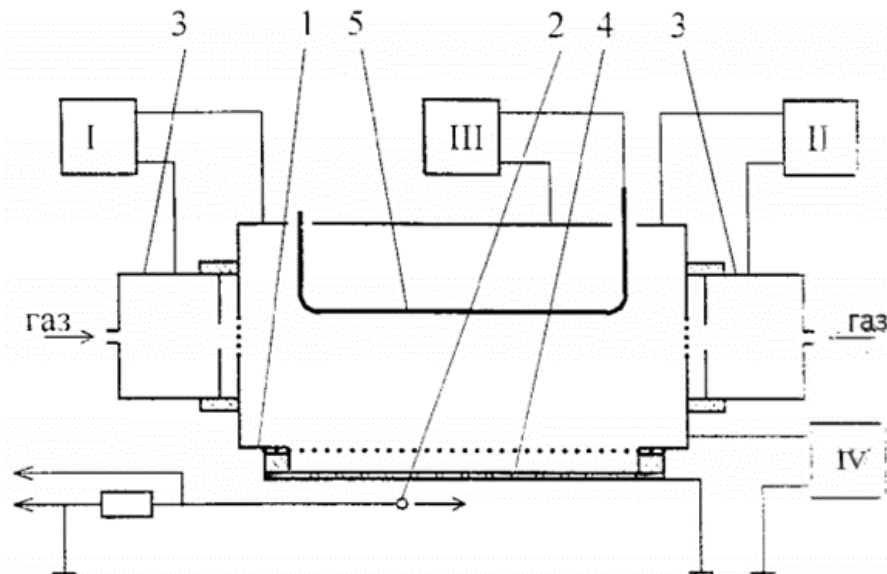


Рисунок 1.10 – Экспериментальный макет разрядной системы [34]:

- 1 – полый катод основного разряда; 2 – подвижный коллектор; 3 – катоды вспомогательного разряда; 4 – маска для отслеживания положения зонда; 5 – анод основного разряда. Источники питания: I, II – вспомогательного разряда; III – основного разряда; IV – ускоряющего напряжения

Отличительной особенностью данной электродной конфигурации является простота конструкции, симметричность системы, энергоэффективность, высокая степень однородности распределения плазмы в объёме рабочей камеры. Инжекция электронов в полый катод тлеющего разряда позволила на два порядка снизить рабочее давление газа, при котором стабильно горит тлеющий разряд. Неоднородность плотности тока электронного пучка через эмиссионное окно шириной 3 см и длиной 40 см составила 7%. При всех плюсах данной конструкции ток несамостоятельного тлеющего разряда (с инъекцией электронов) составлял лишь 1 А.

Увеличение тока тлеющего разряда до 40 А удалось обеспечить путем использования плазмы вспомогательного разряда [39–43]. На рисунке 1.11 представлена схема двухступенчатого разряда с инъекцией электронов.

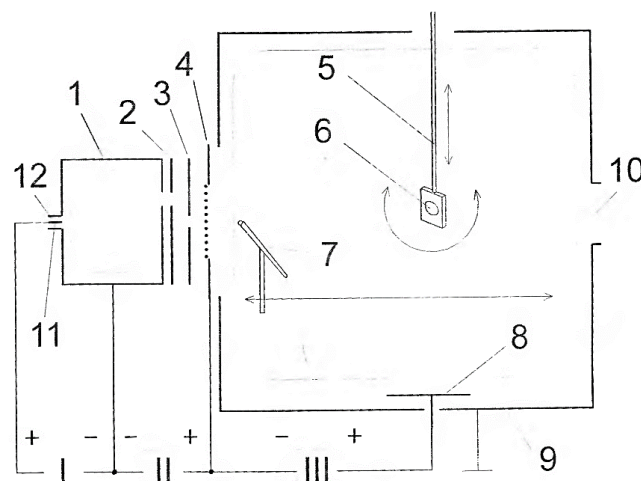


Рисунок 1.11 – Схема двухступенчатого разряда с инъекцией электронов [40]:
 1 – катод эмиттирующего разряда; 2 – экран катода; 3 – защитный экран; 4 – анод эмиттирующего разряда; 5 – подвижный держатель; 6 – плоский лэнгмюровский зонд;
 7 – термоэмиссионный зонд; 8 – анод основного разряда; 9 – вакуумная камера;
 10 – откачка; 11 – поджигающий электрод; 12 – напуск рабочего газа

Электроны инжектировались из плазмы разряда, который горел между полым катодом 1 с выходной апертурой 80 мм и сетчатым анодом 4. Электроды 1, 2, 3, 4 собраны в единую конструкцию и являются катодной ячейкой, которая закреплена на вакуумной камере 9. Электрод 4 служил также катодом для основного разряда, ток которого замыкался на плоский анод 8 площадью 240 мм².

Основной разряд горел в камере 9 диаметром 1200 мм и длиной 800 мм с током ~ 20 А при напряжении 100 В. Плотность ионного тока в разряде составляла ~ 12 А/м².

Для увеличения концентрации плазмы и улучшения распределения концентрации плазмы в объёме рабочей камеры были установлены три дуговые ячейки. На рисунке 1.12 показано распределение концентрации плазмы при использовании трех дуговых ячеек.

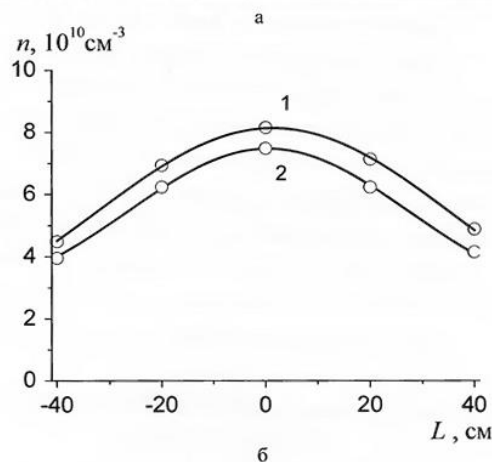
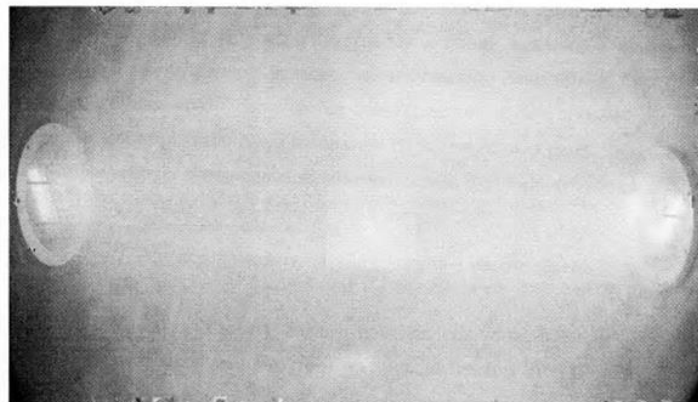


Рисунок 1.12 – Фотография объёмной плазмы (а) и распределение концентрации плазмы в поперечной направлении (б) при работе трех генераторов [40]:
1 – $U_{\text{осн.р.}} = 110$ В; 2 – 80 В; $I_{\text{эм.р.}} = 3 \times 20$ А, $p = 2 \cdot 10^{-1}$ Па. Рабочий газ – аргон

Неоднородность распределения концентрации плазмы в объёме рабочей камеры составила не более $\pm 30\%$.

Исследования тлеющего разряда с полым катодом с инъекцией электронов получили своё продолжение в [8]. В вакуумной камере 3 объёмом 0,25 м³ и размерами 650×650×650 мм, стенки которой являлись полым катодом тлеющего

разряда, при давлении от 0,3 до 1 Па зажигался несамостоятельный тлеющий разряд. Анод тлеющего разряда 1 был выполнен в виде водоохлаждаемых трубок. Площадь поверхности катода $2,3 \cdot 10^4$ см², анода – 150 см², соотношение этих площадей примерно составляет 1:15. Принципиальная схема экспериментального стенда показана на рисунке 1.13.

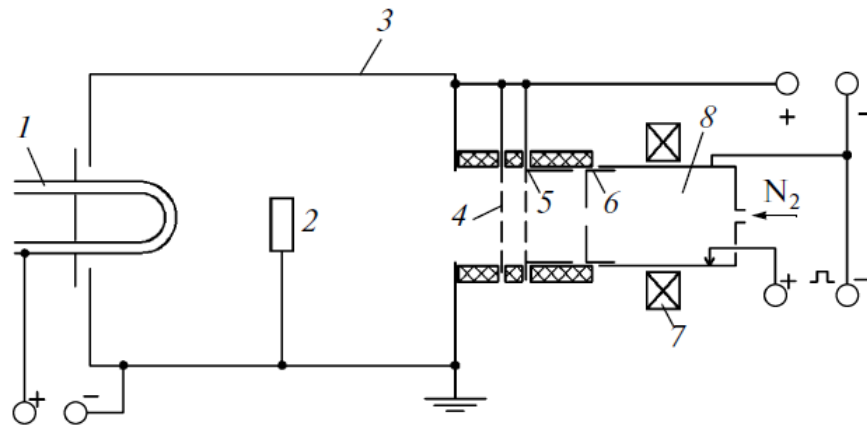


Рисунок 1.13 – Принципиальная схема экспериментального стенда [8]:

- 1 – охлаждаемый водой анод тлеющего разряда; 2 – обрабатываемые образцы;
- 3 – вакуумная камера – полый катод тлеющего разряда; 4 – сетка; 5 – сетчатый полый анод дугового разряда; 6 – диафрагма; 7 – магнитная катушка;
- 8 – вспомогательный поджигающий электрод дугового разряда

Для стабильного зажигания и горения основного несамостоятельного тлеющего разряда использовался инжектор электронов на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом 8 [44]. Катодное пятно перемещалось по внутренней поверхности полого катода 8 в скрещенном электрическом и магнитном поле, созданном магнитной катушкой 7. Для предотвращения ухода катодного пятна из области полого катода вспомогательного дугового разряда была установлена диафрагма 6 с диаметром отверстия 50 см. Эмиссия электронов в полый катод основного тлеющего разряда производилась через эмиссионное окно диаметром 200 мм, перекрытое мелкоструктурной сеткой 5 с размерами ячейки 0,4×0,4 мм. Эмиссионная сетка являлась анодом для вспомогательного дугового разряда и находилась под потенциалом катода основного тлеющего разряда. Для снижения эффективности извлечения электронов на расстоянии 1 см от сетки 5 устанавливалась сетка 4. На рисунке 1.14 показано радиальное распределение

плотности тока на зонд, полученное в полном катоде основного несамостоятельного тлеющего разряда.

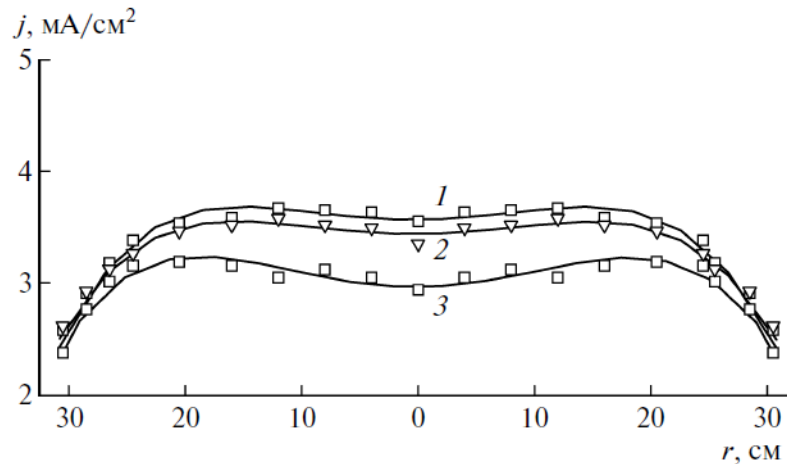


Рисунок 1.14 – Радиальное распределение плотности тока на зонд [8]:
 1, 2 – несамостоятельного тлеющего разряда при $U_{\text{тл}} = 370$ В, $p = 0,64$ Па (1) и 1 Па (2);
 3 – самостоятельного тлеющего разряда при $U_{\text{тл}} = 600$ В, $p = 0,64$ Па.
 Ток тлеющего разряда $I_{\text{тл}} = 30$ А

Анализ рисунка 1.14 показывает, что радиальная степень неоднородности несамостоятельного разряда в пределах 25 см от центра камеры составляет около 10%, а средняя плотность тока на зонд в этой области $j \approx 34$ А/м². Концентрация плазмы составляет $n_i \approx (1,5-2) \cdot 10^{11}$ см⁻³ при температуре электронов $T_e = 1-2$ эВ. Столь высокие значения тока несамостоятельного тлеющего разряда и плотности ионного тока получаются за счет эффекта полого катода, в котором эмитированные электроны могут совершать до 20 актов ионизации до попадания на анод, а также за счет эмиссионной способности самого дугового разряда, из которого извлекаются электроны. При таких высоких значениях концентрации плазмы важную роль играет сеточная слоевая стабилизация плазмы между дуговым разрядом и плазмой несамостоятельного тлеющего разряда. В соответствии с законом Ленгмюра толщину катодного слоя можно оценить как

$$h \approx \frac{\sqrt{2}}{3} \lambda_d \left(\frac{2U}{T_e} \right)^{\frac{3}{4}}, \quad (1.2)$$

где λ_d – радиус Дебая; U – напряжение на катодном слое; T_e – температура электронов.

В данных условиях ширина катодного слоя составляет примерно 1 см.

Большое влияние на распределение плотности тока электронов, которые инжектируются в плазму из вспомогательного разряда в плазму основного разряда, оказывает форма сетчатого эмиссионного электрода. Авторами [45] было предложено использовать модифицированную форму эмиссионной сетки для обеспечения требуемого распределения плотности тока в поперечном сечении пучка электронов. Для эксперимента использовались различные конфигурации эмиттерной сетки (рисунок 1.15).

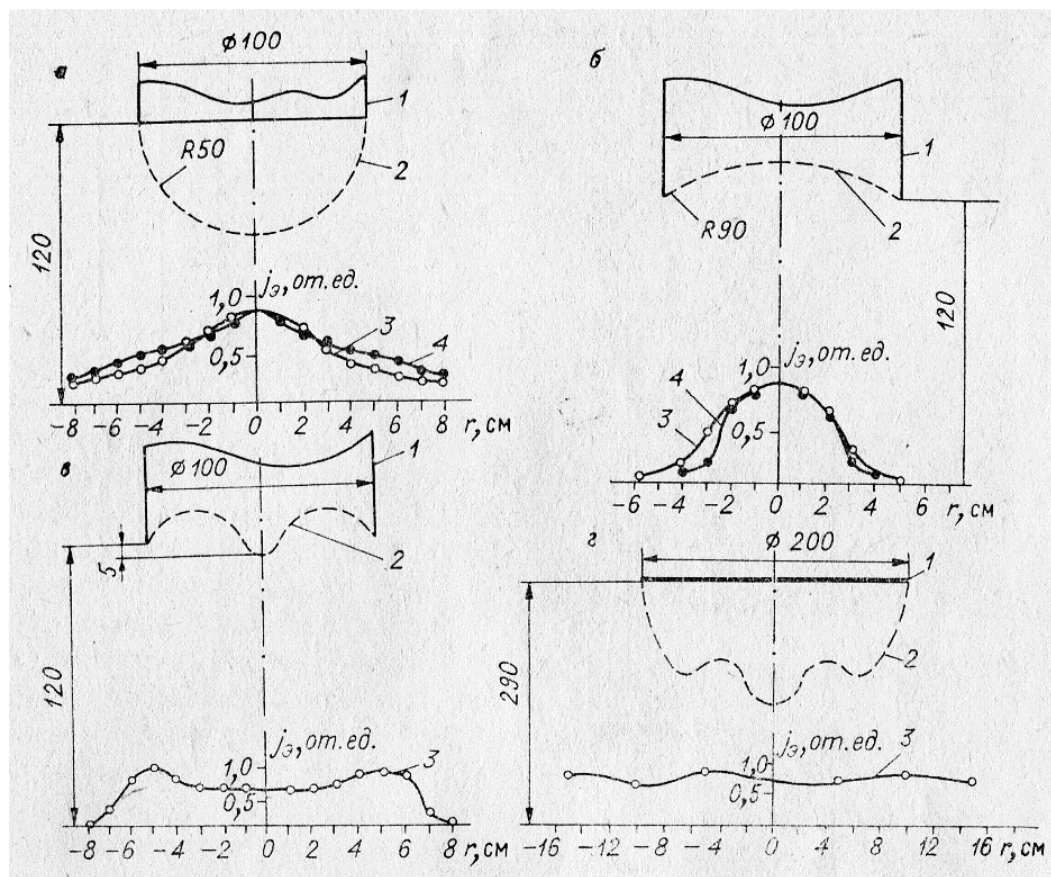


Рисунок 1.15 – Распределения плотности тока электронов по поперечному сечению пучка, измеренные при различных конфигурациях эмиттерных сеток [45]:

1 – главный анод; 2 – эмиттерная сетка; 3 – эксперимент;

4 – расчетное распределение плотности тока

Исследовалась зависимость распределения плотности тока электронов по длине эмиссионного окна от формы сетчатого эмиттера. Наиболее равномерное распределение плотности тока было получено при использовании конфигурации

сетки в форме конусов (рисунок 1.15,з). Плазменный катод использовался в импульсном электроном ускорителе с выводом пучка в атмосферу.

Значительно увеличить концентрацию плазмы и ток несамостоятельного тлеющего разряда можно за счет использования эффекта полого катода, инжекции электронов из плазмы вспомогательного дугового разряда в основной разряд, а также за счет импульсного режима горения основного тлеющего разряда. В электродной системе [46, 47] авторы совместили эффект полого катода, инжекцию электронов и импульсный режим горения тлеющего разряда. Основной несамостоятельный тлеющий разряд горел между стенками вакуумной камеры 3 с размерами $600 \times 600 \times 600$ мм и площадью $2,3 \cdot 10^4$ см², которые находились под потенциалом катода и плоским анодом площадью 1000 см² (рисунок 1.16).

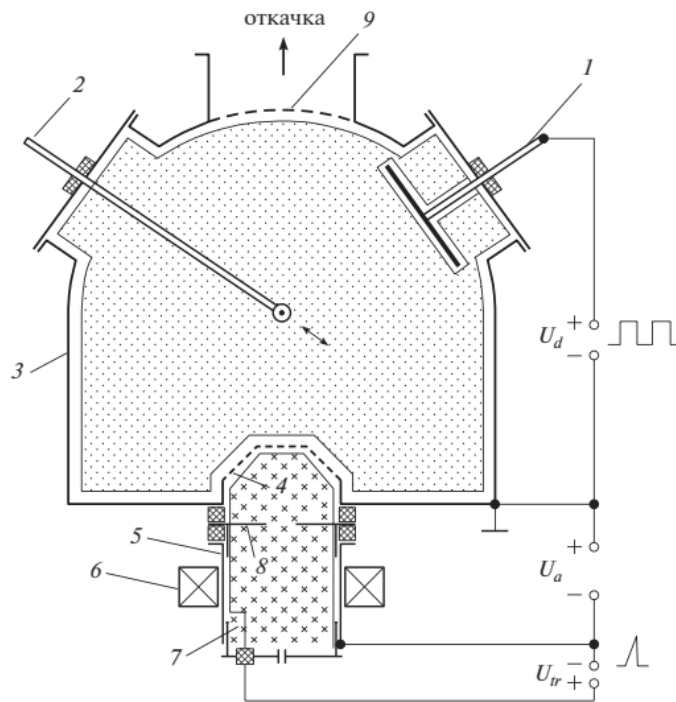


Рисунок 1.16 – Схема экспериментальной установки [46]:

- 1 – анод основного разряда; 2 – цилиндрический одиночный зонд;
- 3 – стенки вакуумной камеры (катод основного разряда); 4 – конусный сетчатый анод вспомогательного дугового разряда; 5 – полый катод вспомогательного дугового разряда; 6 – катушка магнитного поля;
- 7 – поджигающий электрод; 8 – дугогаситель; 9 – сетчатый экран

Электроны инжектировались из вспомогательного дугового разряда с интегрально холодным полым катодом 5 через конусный сетчатый электрод 4,

который являлся анодом для дугового разряда и находился под потенциалом катода основного тлеющего разряда. Конусная форма электрода 4 способствовала более равномерной инжекции электронов, которые производили первичную ионизацию газа, что позволило в разы снизить напряжение горения и зажигания основного разряда. На рисунке 1.17 показано распределение концентрации плазмы и температуры электронов в объеме вакуумной камеры.

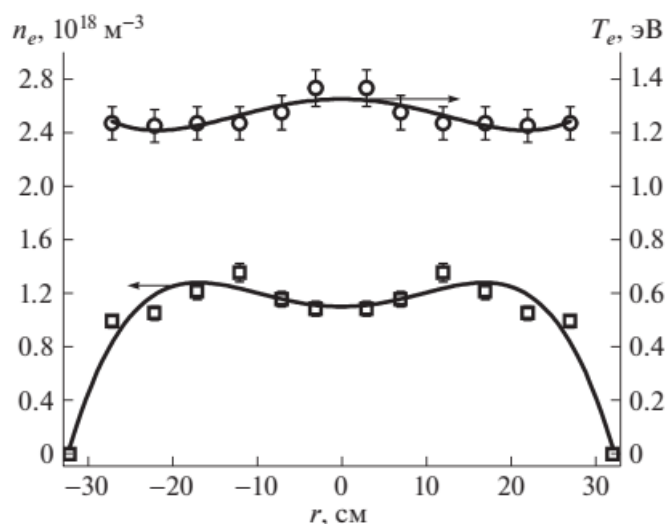


Рисунок 1.17 – Радиальное распределение температуры электронов и концентрации плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде при $U_d = 240 \text{ В}$, $I_d = 370 \text{ А}$, $p(N_2) = 1 \text{ Па}$ [46]

В импульсном режиме горения несамостоятельного тлеющего разряда длительность импульса составляла 340 мкс, частота следования импульсов 1 кГц, давление рабочего газа (азот) 0,65 Па, напряжение горения 240 В, ток в импульсе достигал 370 А, импульсная мощность 90 кВт, средняя мощность 30 кВт, плотность ионного тока 150 А/м^2 . Необходимо отметить, что при таких высоких значениях параметров несамостоятельного тлеющего разряда за счет инжекции электронов сохраняется неоднородность распределения плазмы (35%) в объеме рабочей камеры.

Важную роль в обеспечении низкой степени неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в данной электродной схеме играет форма эмиссионного электрода, форма и расположение анода основного тлеющего разряда, давление рабочего газа, напряжение горения и ток разряда.

В работах [48–54] в результате цикла исследований было выявлено влияние величины тока и напряжения горения тлеющего разряда, давления рабочего газа, формы эмиссионного электрода на однородность распределения ППО в рабочей камере. Электродная схема и режим горения несамостоятельного тлеющего разряда идентичны предыдущей (см. рисунок 1.16). При давлении рабочего газа (азот) 0,65 Па, напряжении горения несамостоятельного тлеющего разряда 180 В, токе 125 А плотность ионного тока достигала 156 А/м^2 , а концентрация плазмы – $1,18 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. На рисунке 1.18 представлена электродная схема экспериментальной установки.

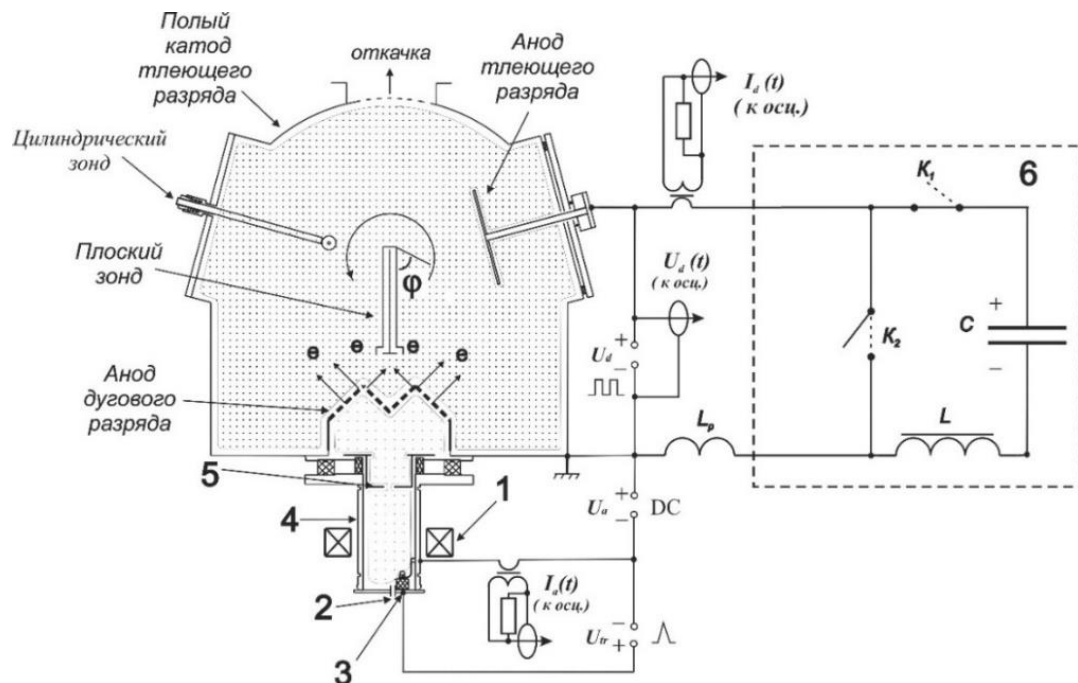


Рисунок 1.18 – Схема экспериментального стенда [48]:

- 1 – катушка магнитного поля; 2 – ввод для напуска газа; 3 – поджигающий электрод; 4 – полый катод вспомогательного дугового разряда; 5 – дугогаситель; 6 – схема выходных цепей источника питания несамостоятельного тлеющего разряда

На рисунке 1.19 представлены азимутальные распределения плотности ионного тока на зонд. В ходе исследований [48] была определена наиболее оптимальная форма сетчатого эмиссионного электрода клинообразной в сечении формы с высотой клина 2 см и показано, что при увеличении тока несамостоятельного тлеющего разряда степень неоднородности распределения концентрации плазмы снижается.

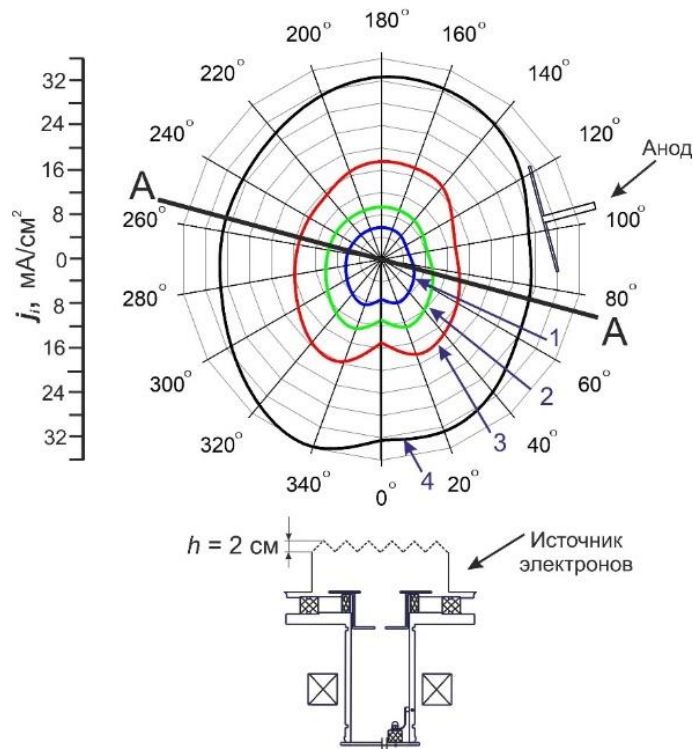


Рисунок 1.19 – Азимутальные распределения плотности ионного тока на зонд при $p(\text{N}_2) = 0,65$ Па, $U_d = 180$ В, I_d : 1 – 75 А; 2 – 120 А; 3 – 180 А; 4 – 240 А [48]

Для разработки способов предсказания результирующего распределения параметров плазменных образований, формируемых в полом катоде тлеющего разряда, проводился ряд работ. Так, в работе [55] представлены результаты математического моделирования генерации плазмы в полом катоде и диффузионное насыщение металлов и сплавов атомами азота в плазме самостоятельного тлеющего разряда низкого давления. Получены характеристики газового разряда. Приводится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. На рисунке 1.20 показана расчетная геометрия электродов тлеющего разряда.

На рисунке 1.21 представлено сравнение экспериментально полученных зависимостей напряжения горения от давления рабочего газа самостоятельного тлеющего разряда с расчетными при различных эффективных длинах L полого катода. Эффективная длина полого катода L рассчитывается по формуле $L = 4V/S_a$ [32], где V – объём полого катода тлеющего разряда; S_a – площадь анода тлеющего разряда.

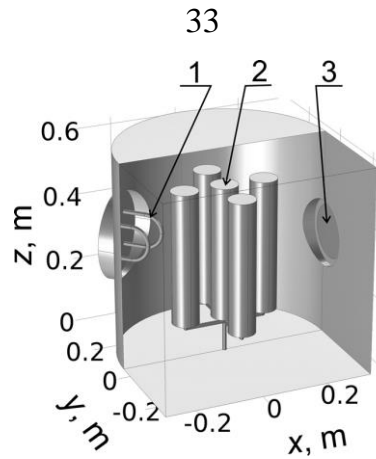


Рисунок 1.20 – Расчетная геометрия электродов [55]:
1 – анод; 2 – мишень; 3 – вспомогательное окно

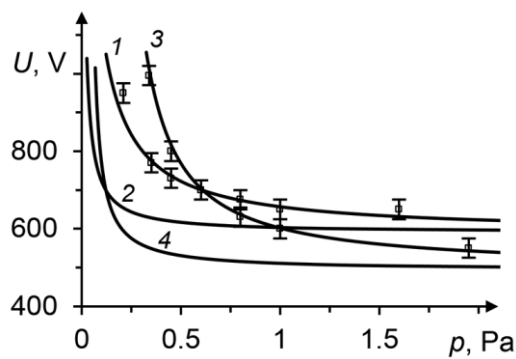


Рисунок 1.21 – Зависимость напряжения самостоятельного тлеющего разряда от давления при различной эффективной длине катодной полости L [55]: 1, 2 – азот; 3, 4 – аргон; при $L = 1,6 \cdot 10^3$ см (1,3), $L = 6,4 \cdot 10^3$ см (2,4); 1, 3 – эксперимент

Из рисунка 1.21 видно, что уменьшение эффективной длины катодной полости приводит к увеличению напряжения горения разряда. Это происходит за счет захвата быстрых электронов анодом, а ток самостоятельного тлеющего разряда поддерживается за счет вторичных электронов при повышении напряжения горения разряда. На рисунке 1.22 показано распределение плазмы самостоятельного тлеющего разряда в азоте.

Эксперименты показывают, что увеличение концентрации азота хорошо коррелирует с увеличением микротвердости поверхности, а увеличение толщины азотированного слоя обеспечивает повышение износостойкости [56, 57]. Математическая модель азотирования описывает кинетику роста слоев и концентрацию профиля азота в каждой фазе и диффузионной зоне при ионном азотировании металла.

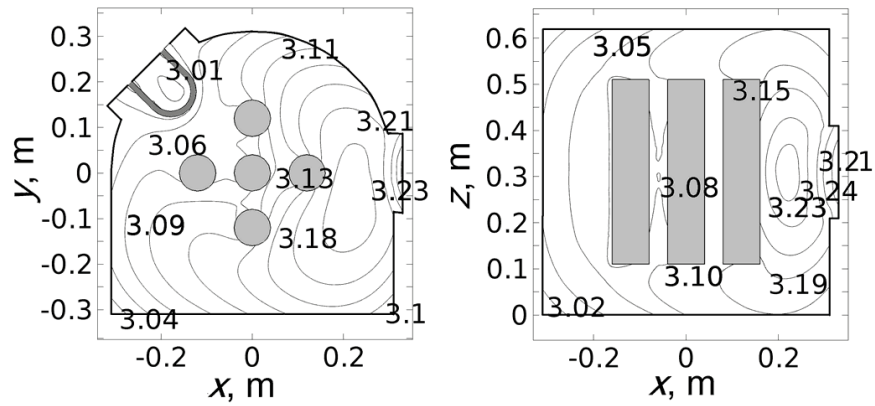


Рисунок 1.22 – Распределение концентрации азотной плазмы (10^{11} см^{-3}) в боковом и продольном сечениях полого катода в несамостоятельном режиме горения тлеющего разряда [55]

В течение последних десятилетий предпринимались постоянные усилия по моделированию кинетики роста слоев и профилей концентрации азота при ионном азотировании [58–62]. В настоящее время существует несколько гипотез, объясняющих процесс азотирования в тлеющем разряде. Однако до сих пор исследователи не пришли к единому мнению по вопросу о механизме насыщения азотом материалов, подвергаемых обработке в плазме газового разряда. На рисунке 1.23 представлены расчетные зависимости распределения азота по глубине в чистом железе и стали 4110.

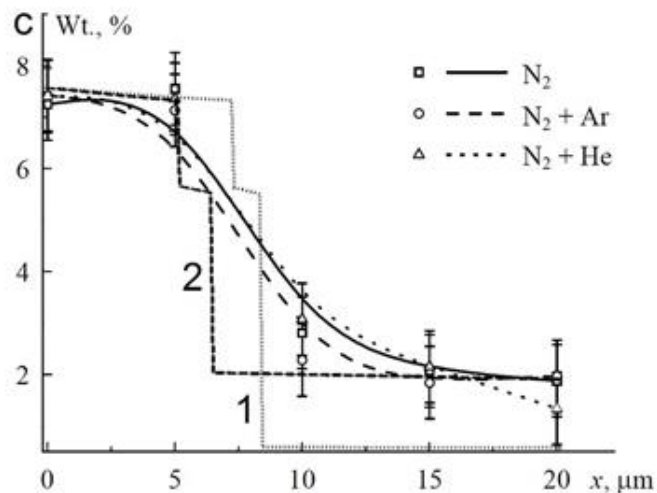


Рисунок 1.23 – Экспериментальное [55] и численное распределение азота по глубине в чистом железе (1) и стали (2)

Таким образом, авторами данной работы представлено решение математической модели и аналитические условия зажигания тлеющего разряда.

С использованием гидродинамического приближения получено также распределение концентрации плазмы в полой катоде тлеющего разряда. Все решения задач теплопроводности и диффузионно-кинетической теории получены в программе MATLAB. Результаты позволяют проводить дальнейшие исследования по эффективному управлению процессами модификации слоев с заданными свойствами [63–65].

Необходимо также отметить, что результаты математического моделирования низкотемпературной плазмы в подавляющем большинстве случаев в той или иной степени расходятся с экспериментом. Для учета всех параметров и физических зависимостей не хватает расчетных мощностей современных компьютеров, поэтому применяется ряд граничных условий с целью получения качественной картины результатов расчета и сравнения её с экспериментом.

Авторы работы [66] провели численное моделирование возможности управления режимом горения тлеющего разряда с протяженным положительным столбом при высоком давлении. Это реализуется при возбуждении стоячей звуковой волны в поперечном направлении распространения положительного столба [67–70]. При этом осуществляется переход тлеющего разряда из контрагированного режима горения в устойчивый диффузный режим горения. Акустические течения перемешивают газ в радиальном направлении, отводят тепло от приосевой области плазменного столба к стенкам трубки, и таким образом происходит распад положительного столба [71–75].

Расчеты проводились для трубки с радиусом $R = 1$ см и межэлектродным расстоянием $L = 4$ см. Давление газа составляло 50 Торр. Напряжение на источнике задавалось равным 2 кВ, балластное сопротивление варьировалось в пределах от 10 до 100 кОм.

На рисунке 1.24 показано пространственное распределение концентрации электронов, а на рисунке 1.25 – радиальное распределение концентрации электронов в сечении $z = 2$ см.

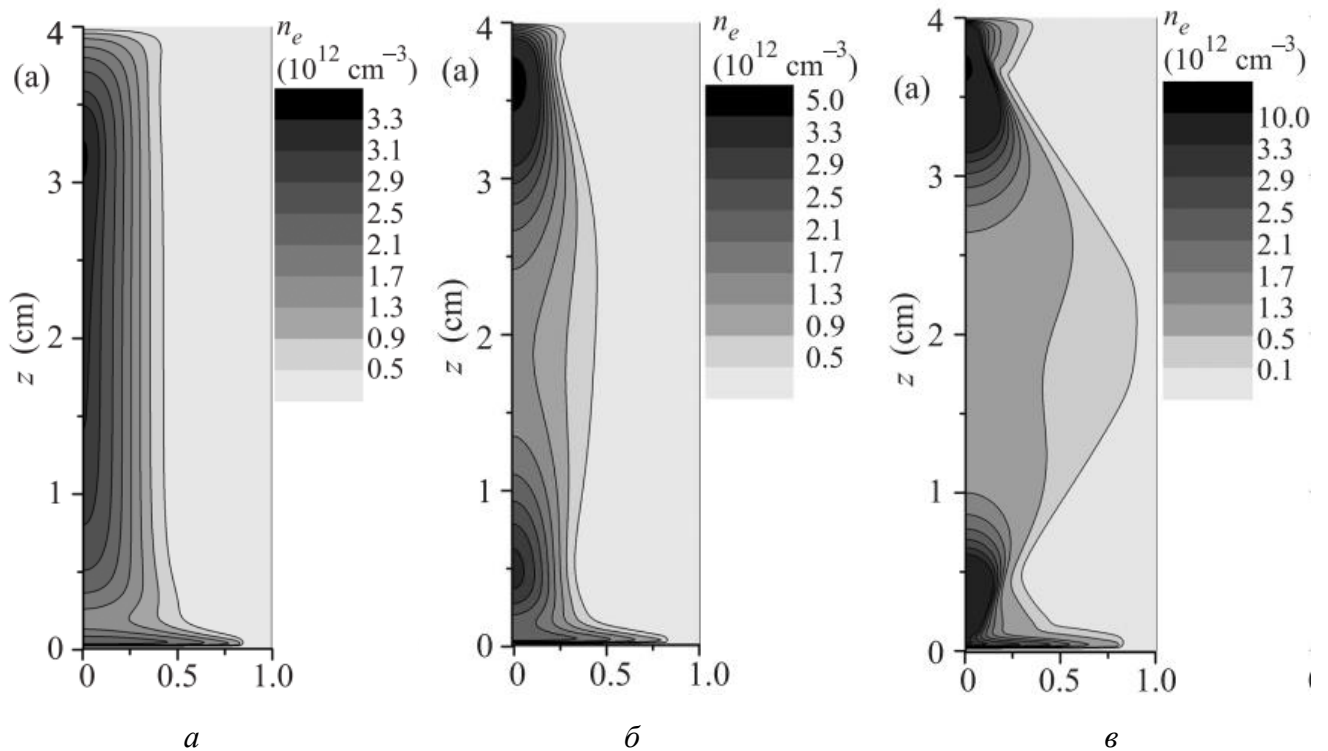


Рисунок 1.24 – Пространственное распределение концентрации электронов: без акустических течений (*а*) [66]; с учетом влияния акустических течений, возникающих при возбуждении стоячей волны с уровнем звукового давления 140 дБ (*б*); с учетом влияния акустических течений, возникающих при организации стоячей волны с уровнем звукового давления 150 дБ (*в*)

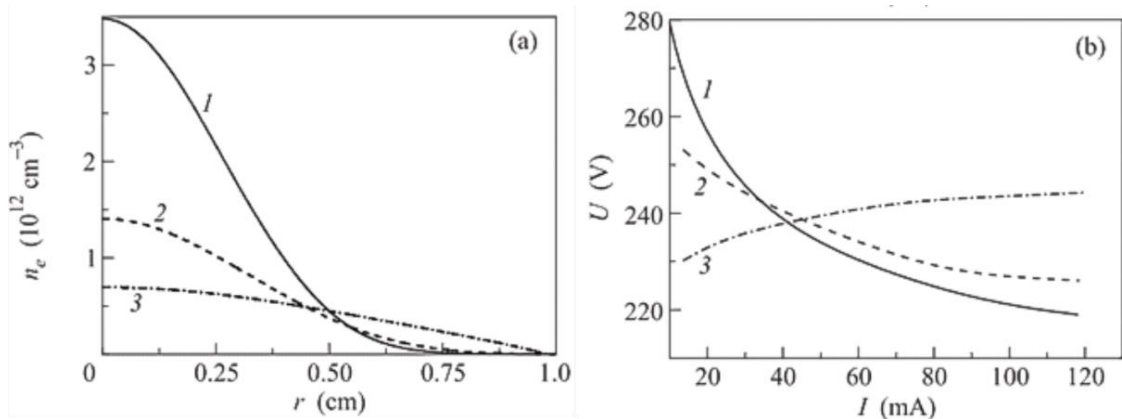


Рисунок 1.25 – Радиальное распределение концентрации электронов в сечении $z = 2$ см [66]: 1 – без учета влияния акустических течений, 2 и 3 – с учетом влияния акустических течений при уровне звукового давления стоячей волны 140 и 150 дБ соответственно (*а*); вольтамперные характеристики тлеющего разряда: 1 – без учета влияния акустических течений, 2 и 3 – с учетом влияния акустических течений при уровне звукового давления стоячей волны 140 и 150 дБ соответственно (*б*)

Авторы данной работы делают выводы, что если в контрагированном режиме горения тлеющего разряда пространственное изменение теплового потока по радиусу связано с джоулевым нагревом, максимум которого наблюдается на оси,

то при организации акустических течений появляется дополнительная скрытая теплота, проявляющаяся в виде термоакустического эффекта по всему пространству разрядной камеры. В результате вольт-амперная характеристика (ВАХ) из падающей становится горизонтальной и даже растущей, что свидетельствует об устойчивом горении тлеющего разряда. Воздействуя акустическими течениями на положительный столб тлеющего разряда, можно перейти от контрагированного к диффузному режиму горения тлеющего разряда, когда радиальное распределение концентрации заряженных частиц начинает приобретать параболический вид. При этом сам разряд становится устойчивым.

Выводы к главе 1

На основании литературного обзора тлеющий разряд с полым катодом наиболее перспективен для генерации объемно-однородных плазменных образований при низких (около 1 Па) давлениях. Инжекция электронов в полый катод тлеющего разряда позволяет значительно снизить напряжение горения тлеющего разряда (до 50 В) и давление рабочего газа (до 0,1 Па), получать относительно высокие значения концентрации плазмы ($\approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$) в стационарном режиме. Импульсный режим горения несамостоятельного тлеющего разряда позволил еще на порядок увеличить концентрацию плазмы несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом. Однако при инъекции электронов в объём плазменного образования возникает неоднородность распределения плазмы в объёме рабочей камеры. Обзор разработанных в последние десятилетия генераторов плазмы на основе тлеющего разряда показывает, что для получения объемно-однородных плазменных образований в больших, в том числе протяженных, вакуумных объёмах перспективной является протяженная цилиндрическая форма рабочей камеры с двумя и более инжекторами электронов или, в некоторых случаях, особая, например протяженная, конфигурация эмиссионного сеточного электрода, через который производится впрыскивание электронов.

Однако на данный момент недостаточно исследованы закономерности и проработаны способы, позволяющие с необходимой точностью спрогнозировать результирующее распределение параметров плазмы в несамостоятельном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом большого объёма.

Исходя из вышеизложенного, были сформулированы следующие задачи диссертационной работы:

1. Выявление закономерностей генерации пучково-плазменных образований в полой катоде несамостоятельного сильноточного тлеющего разряда низкого давления с двумя инжекторами электронов и проверка соблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях, полученных в полой катоде тлеющего разряда при раздельной работе инжекторов электронов при токах тлеющего разряда до 200 А.

2. Выявление закономерностей генерации пучково-плазменных образований в системе на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом и протяженным цилиндрическим полым сетчатым эмиттером, создающим радиально расходящийся пучок электронов, инжектируемых в полый катод тлеющего разряда.

3. Разработка и создание генератора протяженных пучково-плазменных образований с двумя инжекторами электронов для практической реализации ионно-плазменного азотирования крупногабаритных протяженных изделий из металлов и сплавов.

Глава 2. Генерация пучково-плазменных образований в сильноточном тлеющем разряде с полым катодом в осесимметричной системе с использованием двух инжекторов электронов

2.1 Методика и техника эксперимента

2.1.1 Описание экспериментальной установки

Проверка возможности применения принципа суперпозиции проводилась на экспериментальном стенде (рисунок 2.1). Вакуумная камера была изготовлена в виде полого цилиндра диаметром 600 мм, высотой 1200 мм и объемом 0,34 м³ [76, 77]. Основной несамостоятельный тлеющий разряд зажигался между полым катодом, роль которого выполняли стенки вакуумной камеры, и анодом, состоящим из двух колец. Для стабильного зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда использовались вспомогательные источники (инжекторы) электронов на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом. Вспомогательный дуговой разряд в каждом из инжекторов электронов зажигался пробоем по поверхности диэлектрика между полым катодом дугового разряда и конусным сетчатым электродом, который являлся анодом вспомогательного дугового разряда и находился под потенциалом камеры. Электроны, эмитированные через конусный сетчатый электрод, осциллировали в полем катоде тлеющего разряда и производили ионизацию газа, обеспечивая зажигание и горение несамостоятельного тлеющего разряда.

Инжекторы электронов располагались соосно напротив друг друга на продольной оси вакуумной камеры. Ввиду особенностей конструкции вакуумной камеры и ее крепления к станине инжекторы электронов имеют некоторую несимметричность. У выходной апертуры инжектора электронов 1 диаметр равен 240 мм, а у выходной апертуры инжектора электронов 2 диаметр 150 мм, что приводит к изменению условий инжекции электронов и неодинаковости

распределений концентрации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях, получаемых при отдельной работе инжекторов электронов.

В процессе исследований измерение тока тлеющего разряда осуществлялось с помощью датчика Холла CSNJ481, а измерение токов вспомогательных разрядов – датчиком Холла CSNR161 фирмы Honeywell, сигнал с которых подавался на осциллограф Tektronix TDS2014C. Напряжение горения разряда измерялось с помощью осциллографического щупа 1:100.

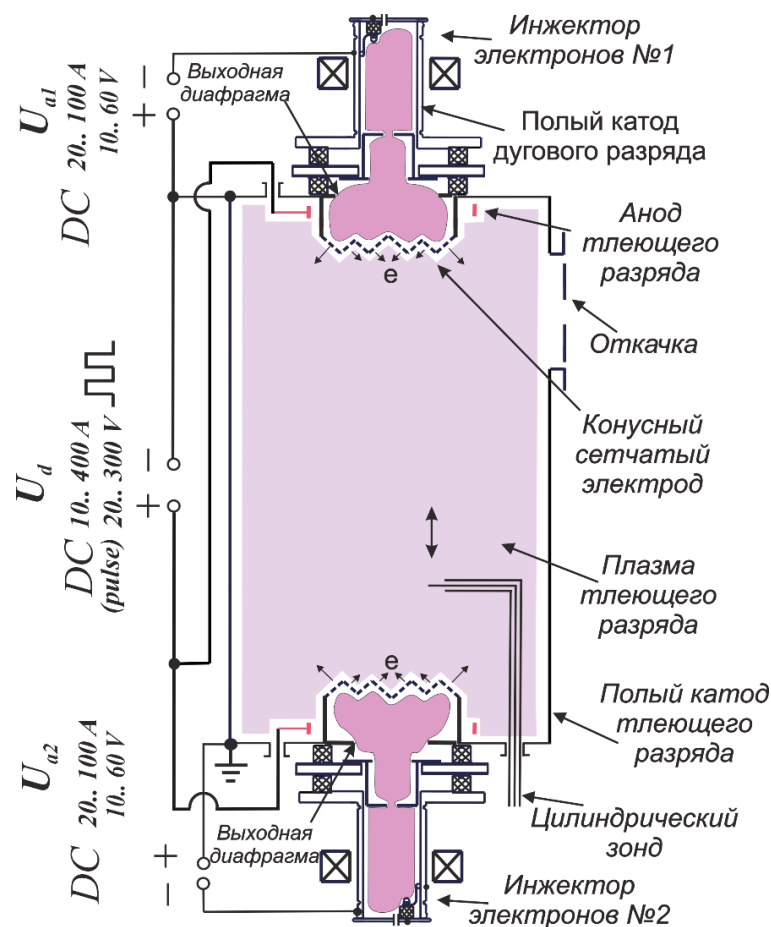


Рисунок 2.1 – Экспериментальный стенд

В работах [78, 79] исследовалось влияние формы и расположения анода тлеющего разряда на распределение плотности ионного тока. Было показано, что оптимальной для анода является форма кольца и расположение его в области геометрической тени для инжектируемых электронов. Снизить степень неоднородности плазмы позволяет также разделение анода на две части и симметричное расположение в полном катоде. Поэтому анод был разделен на две

части, которые устанавливались симметрично относительно центра полого катода. Измерение концентрации плазмы проводилось зондовым методом с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра. Для измерения зондовых характеристик в камеру вводился цилиндрический зонд диаметром 0,8 мм и длиной 4,5 мм. От источника постоянного тока на зонд подавалось напряжение смещения величиной от -100 В до $+100$ В, после чего ток и напряжение зонда одновременно регистрировались диагностической системой. Для каждого режима регистрировалась зондовая характеристика, из которой полуграфическим методом расчета электронной ветви вольт-амперной характеристики зонда определяли требуемые параметры плазмы (потенциал и концентрация плазмы, температура электронов). Зонд перемещался вдоль продольной оси вакуумной камеры от инжектора электронов № 1 с шагом 200 мм поочередно на расстояниях $R = 0, 130$ и 260 мм от продольной оси вакуумной камеры.

Для сравнения величин длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} , рассчитанных с использованием измеренных значений концентрации плазмы, и распределений параметров плазмы (температуры электронов T_e , потенциала плазмы ϕ , концентрации заряженных частиц N) с расчетными, введем коэффициенты неоднородности $k_{\lambda_{ei}}, k_{T_e}, k_{\phi}, k_N$ соответственно. В общем виде коэффициент неоднородности k равен максимальному отклонению величины от среднего значения, деленному на среднее значение этой величины:

$$k_n = \frac{|N_n - N_{cp}|_{\max}}{N_{cp}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где N_n – значение величины параметра плазмы в n -й точке пространства с заданными координатами; N_{cp} – среднее арифметическое значение параметра плазмы в заданных точках пространства.

Длина свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} оценивалась по формуле

$$\lambda_{ei} = \frac{1}{N\delta_c}, \quad (2.2)$$

где N – концентрация плазмы; δ_c – сечение кулоновского взаимодействия [16].

Исследования основных характеристик тлеющего разряда проводились в импульсно-периодическом квазистационарном режиме горения разряда. Поскольку длительность фронта разрядного импульса составляла для различных напряжений горения и мощности в разряде до 2 мс, то все характеристики разряда и измерения параметров плазмы проводились на третьей миллисекунде разрядного импульса при частоте следования импульсов $f = 38$ Гц с коэффициентом заполнения $\gamma = 13\%$ (рисунок 2.2).

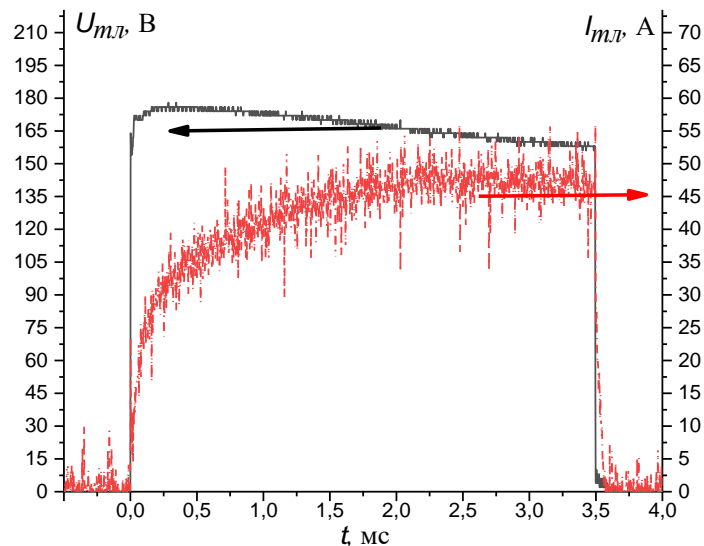


Рисунок 2.2 – Характерные осциллограммы импульсов тока $I_{тл}$ и напряжения $U_{тл}$ несамостоятельного тлеющего разряда

Перед началом эксперимента вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па, затем напускался рабочий газ – азот особой чистоты – до требуемого давления.

В экспериментах, описываемых в данной главе, давление рабочего газа (азота) составляло 0,6 Па, напряжение горения несамостоятельного тлеющего разряда U_d составляло 160 В, токи вспомогательного дугового разряда I_a равнялись 20 А и 45 А. Напряжение горения основного несамостоятельного тлеющего разряда и максимальный ток вспомогательного дугового разряда определяются возможностью работы источника питания тлеющего разряда, при которой

отсутствует существенное (до 15%) снижение напряжения в течение разрядного импульса ввиду ограниченной ёмкости конденсаторной батареи источника питания. При включении двух инжекторов электронов с токами 20 А ток несамостоятельного тлеющего разряда был равен 90 А, при включении двух инжекторов электронов с токами 45 А ток несамостоятельного тлеющего разряда составлял около 200 А.

2.1.2 Характеристики ППО в сильноточном тлеющем разряде

Применимость принципа суперпозиции во многом определяется линейностью системы, то есть в первую очередь линейной зависимостью тока основного тлеющего разряда от тока инжекции. В ходе экспериментов были получены эмиссионные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда (рисунок 2.3). Газовые (рисунки 2.4, 2.5) и вольт-амперные характеристики (рисунки 2.6, 2.7) несамостоятельного тлеющего разряда получены в импульсно-периодическом режиме горения.

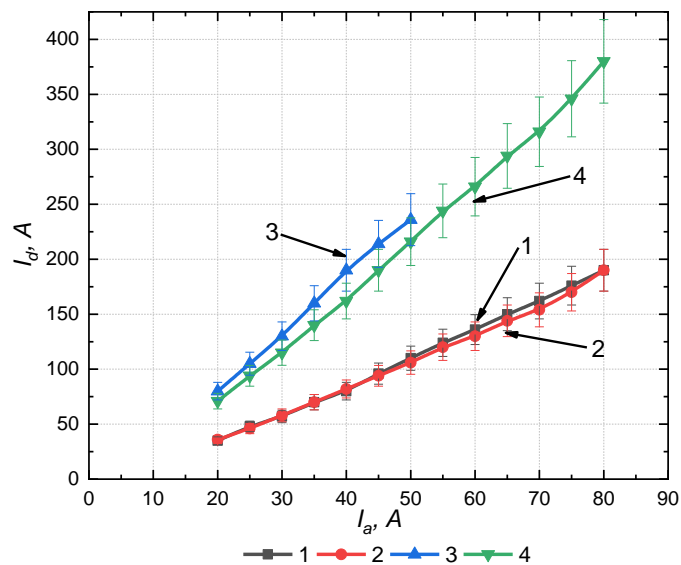


Рисунок 2.3 – Эмиссионные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда:
 1 – при работе инжектора электронов 1; 2 – при работе инжектора электронов 2;
 3 – совместное включение инжекторов электронов; 4 – расчетное распределение

На эмиссионных характеристиках несамостоятельного тлеющего разряда (см. рисунок 2.3) зависимости 1 и 2 для случаев раздельной работы инжекторов

электронов близки друг к другу и практически совпадают, что говорит о близкой эмиссионной способности инжекторов электронов. Зависимости тока несамостоятельного тлеющего разряда I_d от тока дугового разряда при отдельной (1 и 2) и совместной (3) работе инжекторов электронов носят близкий к линейному характер. Зависимость тока 4, полученная при сложении значений точек, полученных при отдельной работе инжекторов электронов (зависимости 1 и 2), с точностью до 15% совпадает с экспериментальной (3). Минимальный ток стабильного горения вспомогательного дугового разряда с катодным пятном составлял 20 А. Необходимо отметить, что электронный ток инжекции в плазму тлеющего разряда с учетом прозрачности сетчатого эмиссионного электрода (45 %) составляет около 9 А. На рисунках 2.4, 2.5 показаны газовые характеристики несамостоятельного тлеющего разряда.

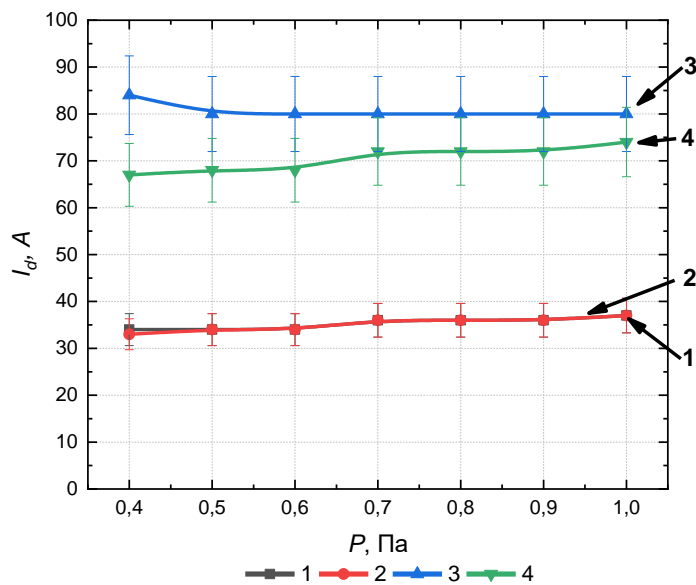


Рисунок 2.4 – Газовые характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, полученные в импульсном режиме, ток дугового разряда 20 А:
 1 – при работе инжектора электронов 1; 2 – при работе инжектора электронов 2;
 3 – совместное включение инжекторов электронов; 4 – расчетное распределение

Газовые характеристики, полученные при отдельной работе инжекторов электронов 1 и 2 близки друг к другу. Степень несовпадения среднего значения точек расчетного распределения с экспериментальным составляет не более чем 15% как для токов дугового разряда 20 А, так и для токов дугового разряда 45 А.

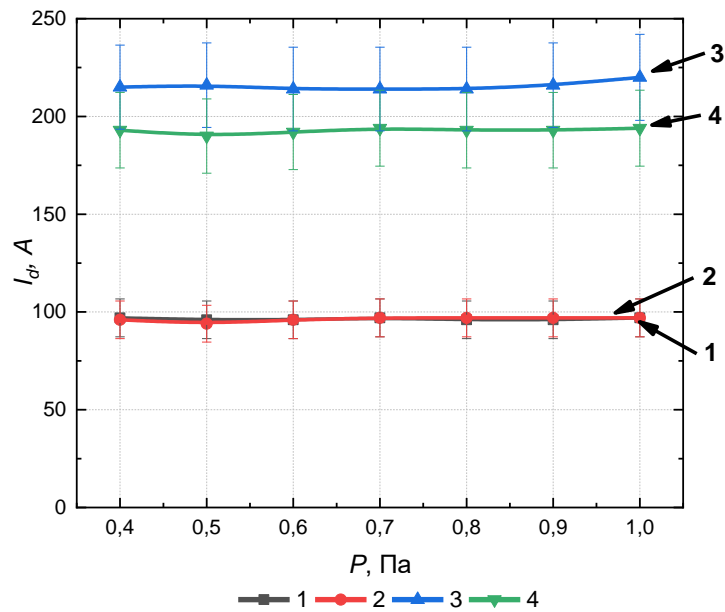


Рисунок 2.5 – Газовые характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, полученные в импульсном режиме, ток дугового разряда 45 А:
 1 – при работе инжектора электронов 1; 2 – при работе инжектора электронов 2;
 3 – совместное включение инжекторов электронов; 4 – расчетное распределение

На рисунках 2.6, 2.7 показаны вольт-амперные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда.

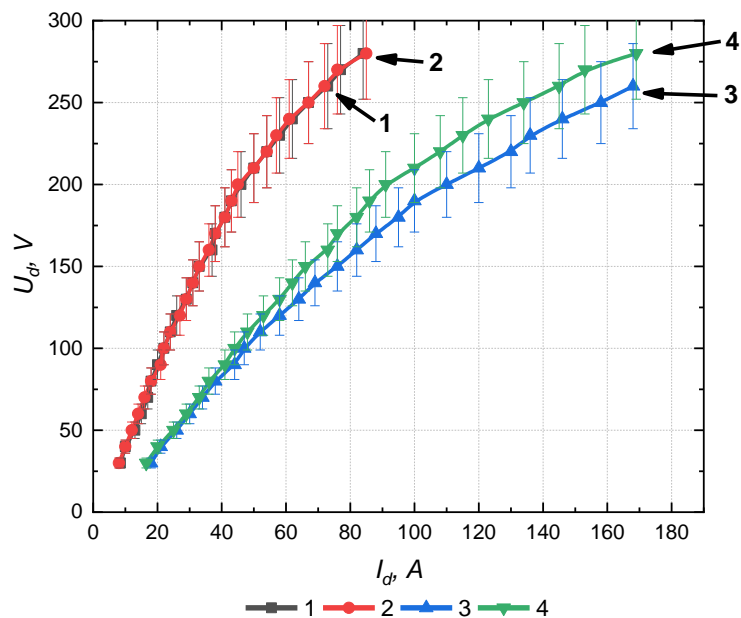


Рисунок 2.6 – Вольт-амперные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, полученные в импульсно-периодическом режиме, ток дугового разряда 20 А:
 1 – при работе инжектора электронов 1; 2 – при работе инжектора электронов 2;
 3 – совместное включение инжекторов электронов; 4 – расчетное распределение

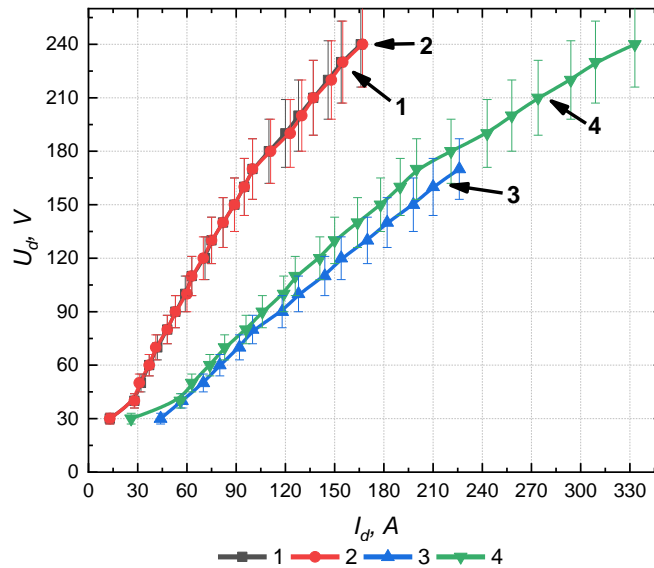


Рисунок 2.7 – Вольт-амперные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, полученные в импульсном режиме, ток дугового разряда 45 А:

- 1 – при работе инжектора электронов 1; 2 – при работе инжектора электронов 2;
- 3 – совместное включение инжекторов электронов; 4 – расчетное распределение

Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда, полученные при раздельной работе инжекторов электронов, совпадают как при токе дугового разряда 20 А, так и при токе дугового разряда 45 А. Расчетные вольт-амперные характеристики с точностью до 15% совпадают с экспериментальными. Разница между экспериментальными и расчетными данными объясняется различием выделяемыми в разрядном импульсе мощностями при совместной работе инжекторов электронов и при их раздельной работе. На рисунке 2.8 показаны мгновенные значения мощности в разряде в течение разрядного импульса.

Осциллограммы 1 и 2 (см. рисунок 2.8), полученные при раздельной работе инжекторов, практически совпадают по форме и интегралу по времени, то есть вложенной в разрядный промежуток энергии с начала импульса. Разница между расчетной осциллограммой и осциллограммой, полученной при совместной работе инжекторов, составляет примерно 15%. Связано это с установкой повышенного значения напряжения на конденсаторной батарее на выходе источника питания тлеющего разряда для фиксации напряжения на уровне 160 В на третьей миллисекунде разрядного импульса в эксперименте при совместной работе инжекторов электронов.

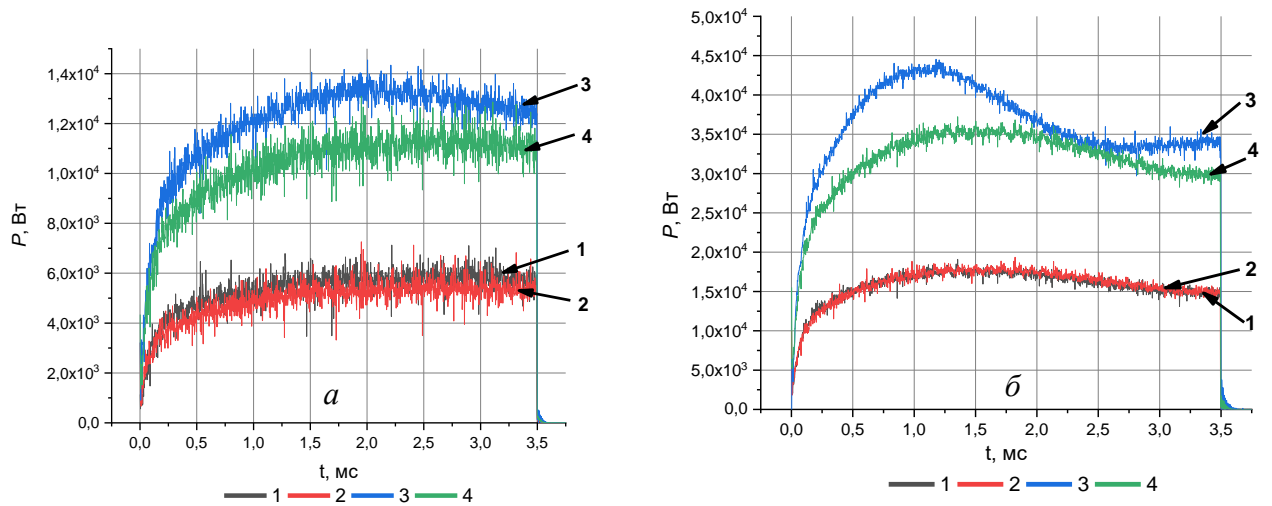


Рисунок 2.8 – Зависимости мощности от времени, полученные в импульсном режиме:
 а – при токах дугового разряда 20 А; б – при токах дугового разряда 45 А;
 1 – при работе инжектора электронов 1; 2 – при работе инжектора электронов 2;
 3 – совместное включение инжекторов электронов; 4 – расчетное распределение

Такое повышение напряжения тлеющего разряда (осциллограммы 3 на рисунке 2.9) приводило к повышению тока тлеющего разряда и, как следствие, значению мгновенной мощности в начале импульса при совместной работе инжекторов. То есть выделенная в разряде энергия при совместном включении двух инжекторов электронов превосходит сумму выделенных энергий при раздельной работе инжекторов.

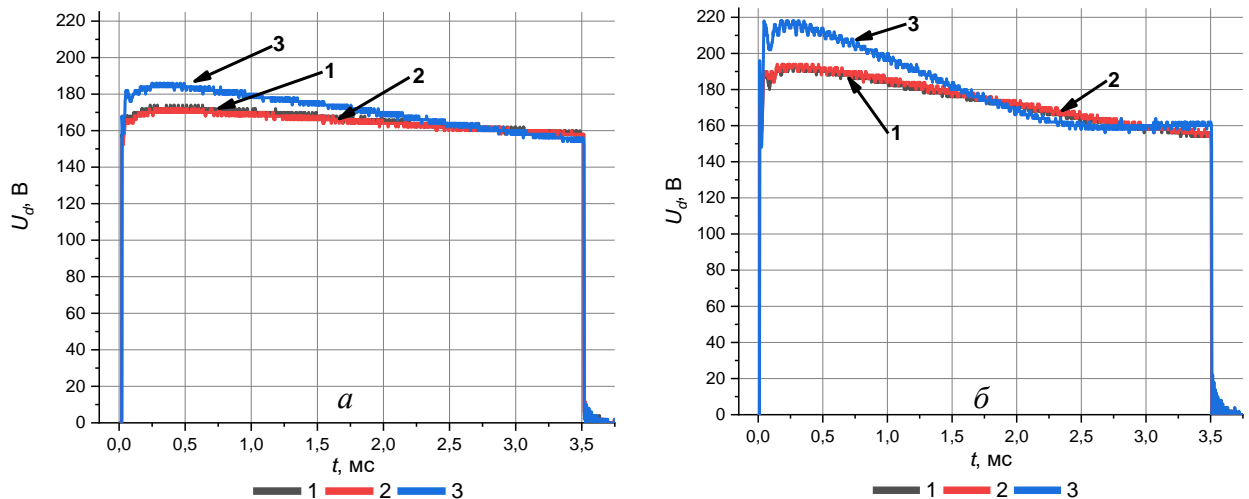


Рисунок 2.9 – Осциллограммы напряжения, полученные в импульсном режиме:
 а – при токах дугового разряда 20 А; б – при токах дугового разряда 45 А;
 1 – при работе инжектора электронов 1; 2 – при работе инжектора электронов 2;
 3 – совместное включение инжекторов электронов

2.1.3 Методика и оборудование для проведения зондовых измерений

Измерения основных параметров плазмы проводились с помощью одиночного цилиндрического зонда и использованием автоматизированной системы зондовых измерений. Автоматизированная система обеспечивала запись значений тока и напряжения на зонд, измеряемых в заданный момент времени, синхронизацию момента измерения точек ВАХ, получение заданного количества точек. С выхода источника питания на зонд подавалось переменное синусоидальное напряжение амплитудой от -100 В до $+100$ В. По результатам измерений строились зависимости тока от напряжения $I_3 = f(U_3)$ (кривая 1) и логарифма тока (в миллиамперах) от напряжения $\ln(I_3) = f(U_3)$. Потенциал плазмы ϕ и значение электронного тока насыщения I_{e3}^0 , при котором потенциал зонда равен потенциалу плазмы, определялись полуграфическим методом по точке пересечения касательных, проведенных к области линейного роста кривой $\ln(I_3) = f(U_3)$, и аппроксимации прямого участка ВАХ зонда в области насыщения.

Температура электронов вычисляется из зондовой характеристики по углу ее наклона в линейно растущей части:

$$T_e = \frac{\Delta U_3}{\Delta \ln I_3}. \quad (2.3)$$

Для наглядности была проведена обратная операция над аппроксимирующей областью линейного роста логарифма тока прямой (возведение в степень экспоненты) и наложена на график ВАХ зонда. Как видно, полученная кривая 2 соответствует области экспоненциального роста ВАХ зонда (рисунок 2.10). Дополнительно на рисунке 2.10 показана аппроксимирующая прямая 3 к области насыщения тока электронов.

Концентрация плазмы N рассчитывается по электронной ветви ВАХ зонда, исходя из полученного значения тока электронов на зонд I_{e3}^0 и температуры электронов T_e по формуле [80, 81]

$$N = \frac{I_{e3}^0}{eS_3 \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}}}, \quad (2.4)$$

где S_3 – площадь зонда.

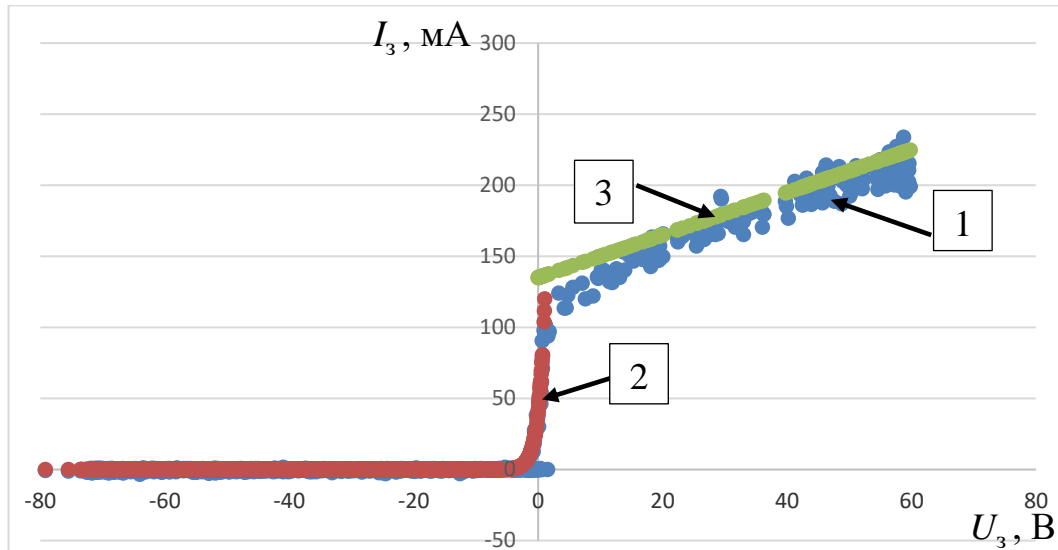


Рисунок 2.10 – Вольт-амперная характеристика цилиндрического зонда

Зондовые измерения продольных распределений параметров пучково-плазменных образований проводились в каждом эксперименте следующим образом. Сначала включался инжектор электронов № 1 (режим 1), измерялись ВАХ зонда в шести позициях – на расстояниях 0, 200, 400, 600, 800 и 1000 мм от инжектора электронов № 1, на основании которых в последующем строилось продольное распределение концентрации заряженных частиц N_e . Затем инжектор электронов № 1 выключали и включали инжектор электронов № 2 (режим 2), также проводилось измерение ВАХ зонда в тех же шести позициях. Затем оба инжектора электронов включали совместно (режим 3) и измеряли ВАХ зонда. Далее, после обработки зондовых характеристик и определения значений концентрации заряженных частиц, значения, полученные в одинаковых координатах при раздельной работе инжекторов электронов, складывались и получалось расчетное суммарное распределение концентрации заряженных частиц в пучково-плазменном образовании (режим 4). Эксперимент проводили для двух выбранных токов вспомогательного дугового разряда (20 А и 45 А).

2.1.4 Результаты зондовых измерений

На рисунке 2.11 показаны продольные распределения концентрации заряженных частиц в пологом катоде тлеющего разряда на его оси и радиусах 130 и 260 мм. Распределения получены для токов вспомогательного дугового разряда 20 А в инжекторах электронов. На каждом графике приведены распределения, полученные при отдельной (кривые 1 и 2) и совместной (кривая 3) работе инжекторов электронов, а также сумма распределений 1 и 2 (кривая 4).

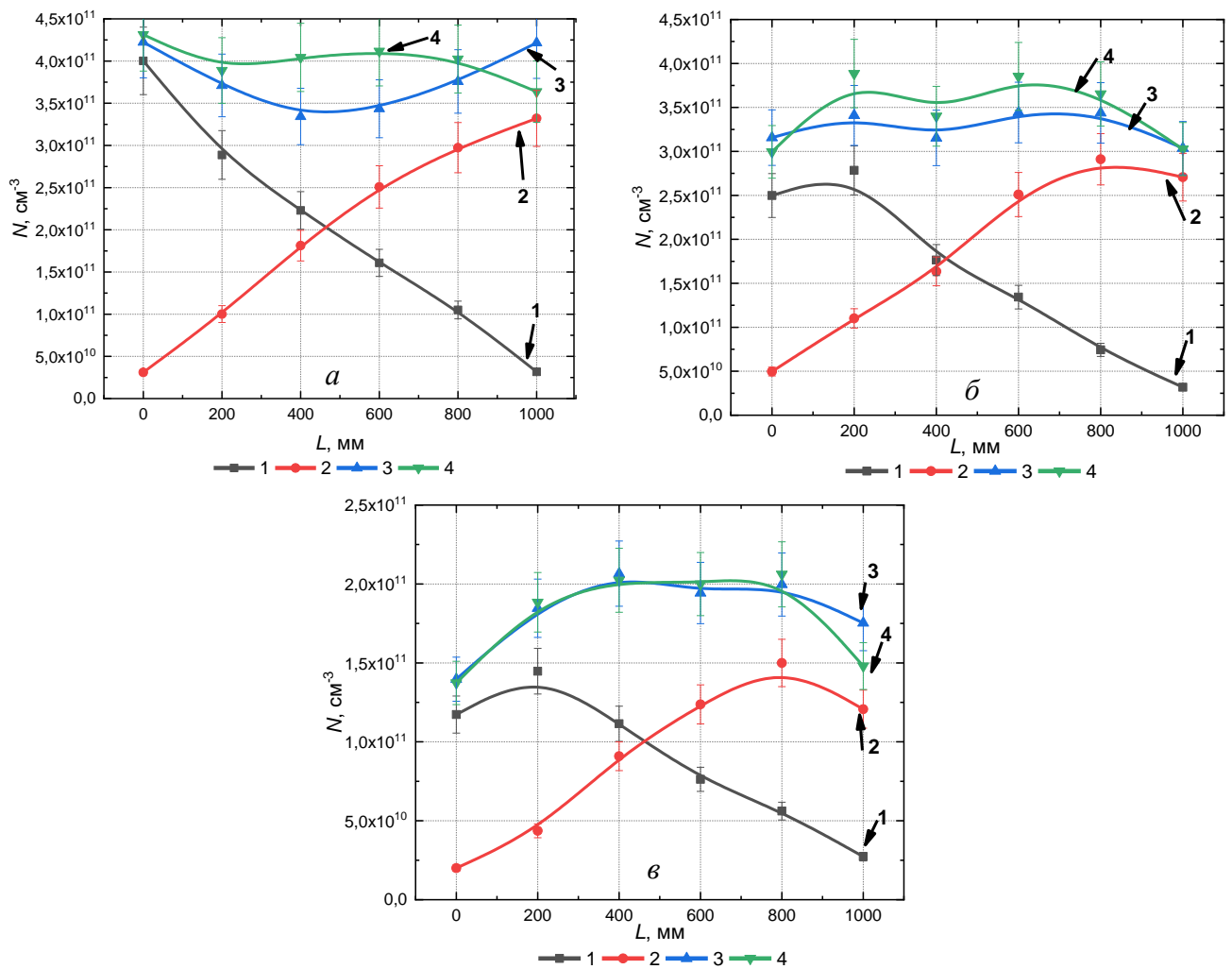


Рисунок 2.11 – Распределение концентрации плазмы при токах вспомогательного дугового разряда 20 А: *a* – на оси полого катода тлеющего разряда; *б* – на радиусе 130 мм; *в* – на радиусе 260 мм; 1 – при работе инжектора электронов 1 (режим 1); 2 – при работе инжектора электронов 2 (режим 2); 3 – совместное включение инжекторов электронов (режим 3); 4 – сумма распределений 1 и 2 (режим 4)

На оси полого катода при раздельной работе инжекторов электронов наблюдается прогнозируемый, близкий к линейному, спад концентрации заряженных частиц. На радиусах 130 и 260 мм вблизи поверхности эмиссионной сетки источников электронов отмечается спад концентрации заряженных частиц, который обусловлен уменьшением плотности потока инжектированных электронов в этих периферийных областях, в результате плотность взаимодействий с нейтралами в этой области ниже. На расстоянии 1000 мм от эмиссионной сетки концентрация заряженных частиц спадает примерно на два порядка. На радиусах 130 мм и 260 мм при токе вспомогательного дугового разряда 20 А форма суммарного распределения (кривая 4) и распределения, полученного при совместной работе двух инжекторов электронов (кривая 3), подобны и полученные абсолютные значения концентрации заряженных частиц различаются более чем на 15%. На рисунке 2.12 представлены продольные распределения концентрации заряженных частиц в полном катоде тлеющего разряда при токах вспомогательного дугового разряда в источниках электронов 45 А.

Сравнение графиков, полученных при токах вспомогательного дугового разряда 20 и 45 А, показывает, что при значениях тока 45 А на оси полого катода тлеющего разряда и на радиусе 130 мм в среднем разность между точками графиков 3 и 4 значительно выше. По абсолютным значениям различие составляет примерно 25%.

На радиусе 260 мм форма расчетного распределения резко отличается от экспериментального, а по абсолютным значениям различие составляет 30%. При этом кривая 3 для токов вспомогательного дугового разряда 45 А и соответствующего тока тлеющего разряда 200 А для измерений на оси, радиусах 130 и 260 мм демонстрируют малую степень неоднородности в отличие от графиков для токов вспомогательного разряда 20 А (ток тлеющего разряда около 90 А).

Для определения причин существенного отличия расчетных данных от экспериментальных и для более наглядного представления результатов зондовых измерений были построены карты распределений основных параметров плазмы

(температуры электронов, потенциала и концентрации) тлеющего разряда. Карты распределений параметров плазмы в полном катоде строились по имеющимся экспериментальным данным путем интерполяции по радиусу и длине протяженного полого катода, а также экстраполяции по объёму полого катода.

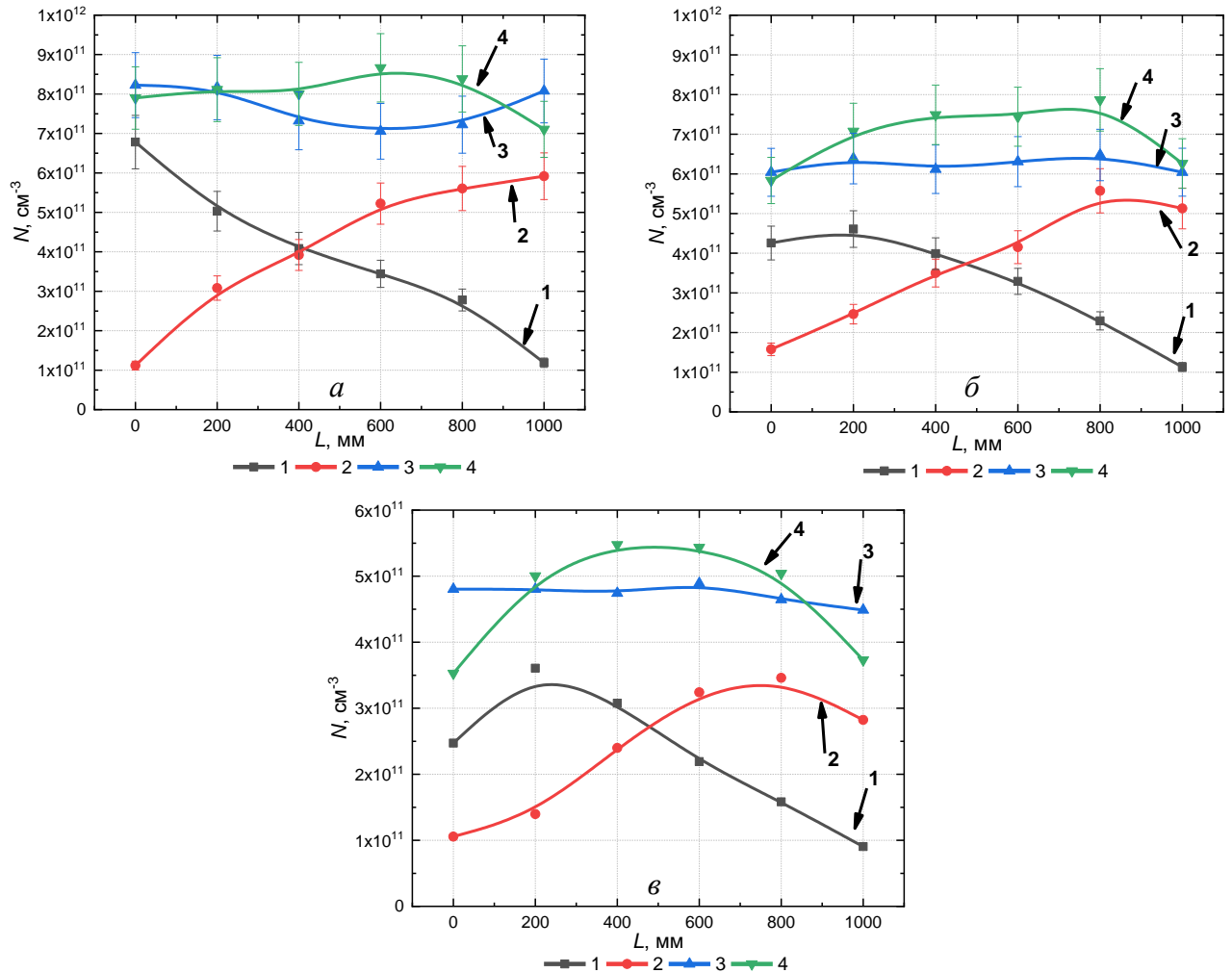


Рисунок 2.12 – Распределение концентрации плазмы при токах вспомогательного дугового разряда 45 А: *a* – на оси полого катода тлеющего разряда; *б* – на радиусе 130 мм; *в* – на радиусе 260 мм; 1 – при работе инжектора электронов 1 (режим 5); 2 – при работе инжектора электронов 2 (режим 6); 3 – совместное включение инжекторов электронов (режим 7); 4 – сумма распределений 1 и 2 (режим 8)

Для каждого параметра плазмы была составлена таблица (таблицы 2.1, 2.2, 2.3), в которой L – это расстояние, на которое зонд удалялся от поверхности инжектора электронов 1 вдоль оси полого катода, а R – расстояние (радиус) от оси полого катода, на котором находился зонд в каждой точке перемещения при

продольном движении зонда вдоль оси полого катода. Для примера приведены данные, полученные в режиме 1.

Таблица 2.1 – Значения концентрации плазмы N , см^{-3}

L , мм		0	200	400	600	800	1000
R , мм	0	$4 \cdot 10^{11}$	$2,89 \cdot 10^{11}$	$2,23 \cdot 10^{11}$	$1,61 \cdot 10^{11}$	$1,05 \cdot 10^{11}$	$3,17 \cdot 10^{10}$
	130	$2,5 \cdot 10^{11}$	$2,78 \cdot 10^{11}$	$1,76 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$7,43 \cdot 10^{10}$	$3,19 \cdot 10^{10}$
	260	$1,17 \cdot 10^{11}$	$1,45 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$5,62 \cdot 10^{10}$	$2,73 \cdot 10^{10}$

Таблица 2.2 – Значения потенциала плазмы φ , В

L , мм		0	200	400	600	800	1000
R , мм	0	2,12	2,16	1,83	1,80	1,29	0,89
	130	1,92	1,83	1,94	1,56	1,09	0,89
	260	1,43	1,54	1,25	1,09	0,83	0,76

Таблица 2.3 – Значения температуры электронов T_e , эВ

L , мм		0	200	400	600	800	1000
R , мм	0	0,95	0,85	0,75	0,8	0,7	0,7
	130	0,8	0,8	1	0,95	1	0,8
	260	0,85	0,8	1	1	0,75	0,8

Далее с использованием кубического сплайна в программном пакете *Excel* были вычислены промежуточные между экспериментально полученными значения параметров плазмы для промежуточных радиусов. Таким образом, сетка значений радиусов и значений параметров плазмы была увеличена для обеспечения качественного сглаживания параметров на карте распределения. Результат этих операций представлен в таблице 2.4 на примере значений концентрации плазмы.

Затем с использованием операции линейной интерполяции были заполнены промежуточные значения параметра в точках для продольного перемещения зонда при движении в сторону от источника электронов 1. Рассчитанные на основе зондовых измерений значения концентрации плазмы выделены в таблице жирным шрифтом. Результаты вычисления промежуточных значений концентрации плазмы представлены в приложении А (таблица А.1) на примере значений концентрации плазмы.

Таблица 2.4 – Значения концентрации плазмы N , см^{-3}

L , мм		0	200	400	600	800	1000
R , мм	0	$4 \cdot 10^{11}$	$2,89 \cdot 10^{11}$	$2,23 \cdot 10^{11}$	$1,61 \cdot 10^{11}$	$1,05 \cdot 10^{11}$	$3,17 \cdot 10^{10}$
	32,5	$3,62 \cdot 10^{11}$	$2,93 \cdot 10^{11}$	$2,12 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{11}$	$9,66 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{10}$
	65	$3,23 \cdot 10^{11}$	$2,95 \cdot 10^{11}$	$2,01 \cdot 10^{11}$	$1,51 \cdot 10^{11}$	$8,85 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	97,5	$2,86 \cdot 10^{11}$	$2,91 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{11}$	$1,44 \cdot 10^{11}$	$8,09 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	130	$2,5 \cdot 10^{11}$	$2,78 \cdot 10^{11}$	$1,76 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$7,43 \cdot 10^{10}$	$3,19 \cdot 10^{10}$
	162,5	$2,15 \cdot 10^{11}$	$2,55 \cdot 10^{11}$	$1,62 \cdot 10^{11}$	$1,22 \cdot 10^{11}$	$6,87 \cdot 10^{10}$	$3,11 \cdot 10^{10}$
	195	$1,82 \cdot 10^{11}$	$2,23 \cdot 10^{11}$	$1,46 \cdot 10^{11}$	$1,08 \cdot 10^{11}$	$6,41 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$
	227,5	$1,49 \cdot 10^{11}$	$1,85 \cdot 10^{11}$	$1,29 \cdot 10^{11}$	$9,26 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$2,87 \cdot 10^{10}$
	260	$1,17 \cdot 10^{11}$	$1,45 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$5,62 \cdot 10^{10}$	$2,73 \cdot 10^{10}$

Наша электродная система является аксиально-симметричной, поэтому мы можем принять значения параметра плазмы, взятые в любой точке в объёме полого катода тлеющего разряда действительными на данной высоте по всему выбранному радиусу. Таким образом, интерполируя по радиусу, можно получить результирующую карту распределения параметров плазмы в объёме полого катода основного тлеющего разряда. Результат показан в приложении А (таблица А.2) на примере значений концентрации плазмы.

Далее массив рассчитанных данных использовался для построения пространственной карты распределения параметра в цвете в программном пакете Origin. Полученный результат представлен на рисунке 2.13. Для наглядности на карте распределения концентрации плазмы схематично указано расположение инжектора электронов 1.

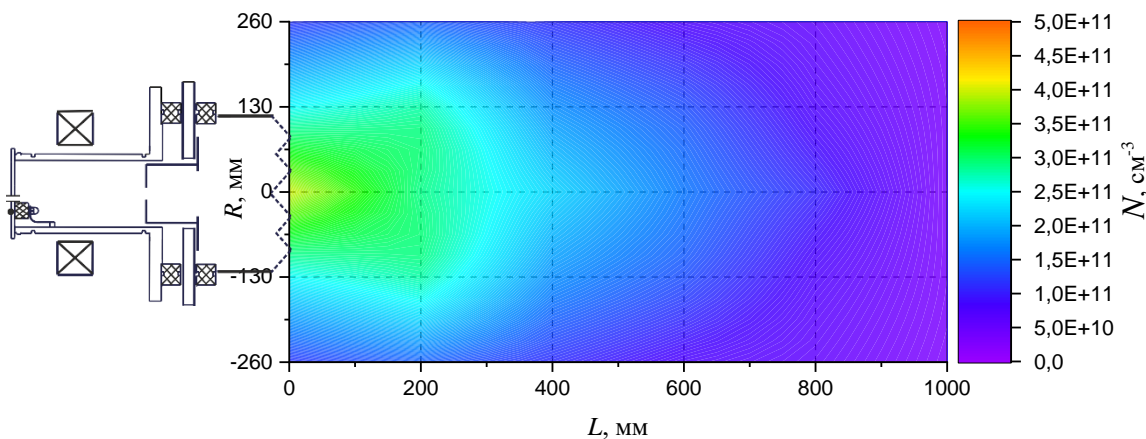


Рисунок 2.13 – Распределение концентрации плазмы при включении инжектора электронов № 1 и токе дугового разряда 20 А (режим 1)

2.2 Параметры пучково-плазменных образований в полом катоде с двумя инжекторами электронов

Распределение концентрации плазмы, представленное на рисунке 2.13, как уже говорилось выше, получено при токе дугового разряда 20 А во вспомогательном дуговом разряде источника электронов № 1 (режим 1).

На рисунке 2.14 представлено распределение концентрации плазмы при включении инжектора электронов № 2 и токе дугового разряда 20 А (режим 2).

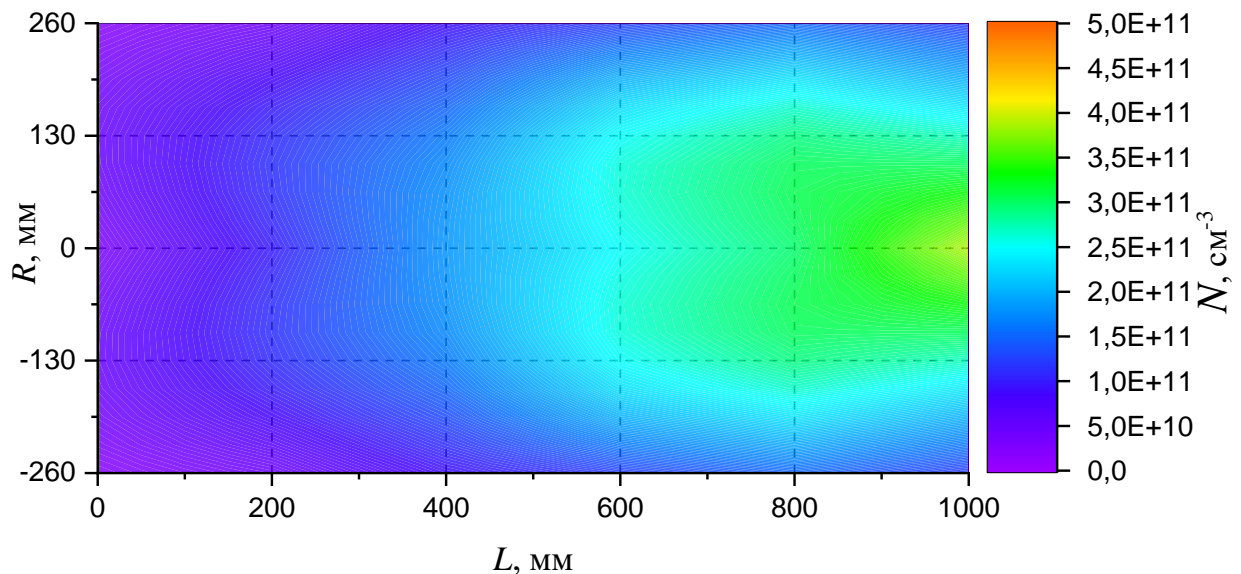


Рисунок 2.14 – Распределение концентрации плазмы при включении инжектора электронов № 2 и токе дугового разряда 20 А (режим 2)

Распределения на рисунках 2.13 и 2.14 имеют схожий характер, максимум концентрации плазмы вблизи области инжекции электронов в тлеющий разряд и при удалении от эмиссионной сетки – постепенное снижение величины концентрации плазмы в продольном и радиальном направлениях. На рисунке 2.15 представлено распределение концентрации плазмы при совместном включении инжекторов электронов № 1 и № 2 при токах дугового разряда 20 А (режим 3).

При совместном включении инжекторов электронов распределение концентрации заряженных частиц на радиусе до ≈ 200 мм имеет относительно низкую степень неоднородности. На рисунке 2.16 представлено распределение

концентрации заряженных частиц (режим 4), полученное в результате суммы распределений 1 и 2 (режимы 1 и 2).

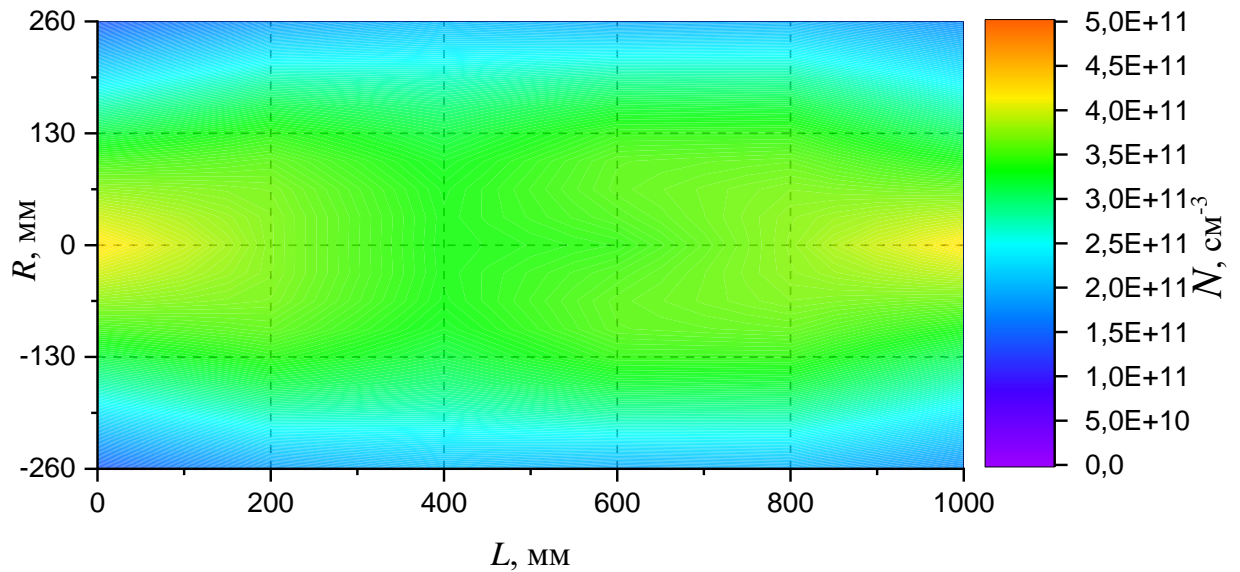


Рисунок 2.15 – Распределение концентрации плазмы при совместном включении инжекторов электронов № 1 и № 2 и токах дугового разряда 20 А (режим 3)

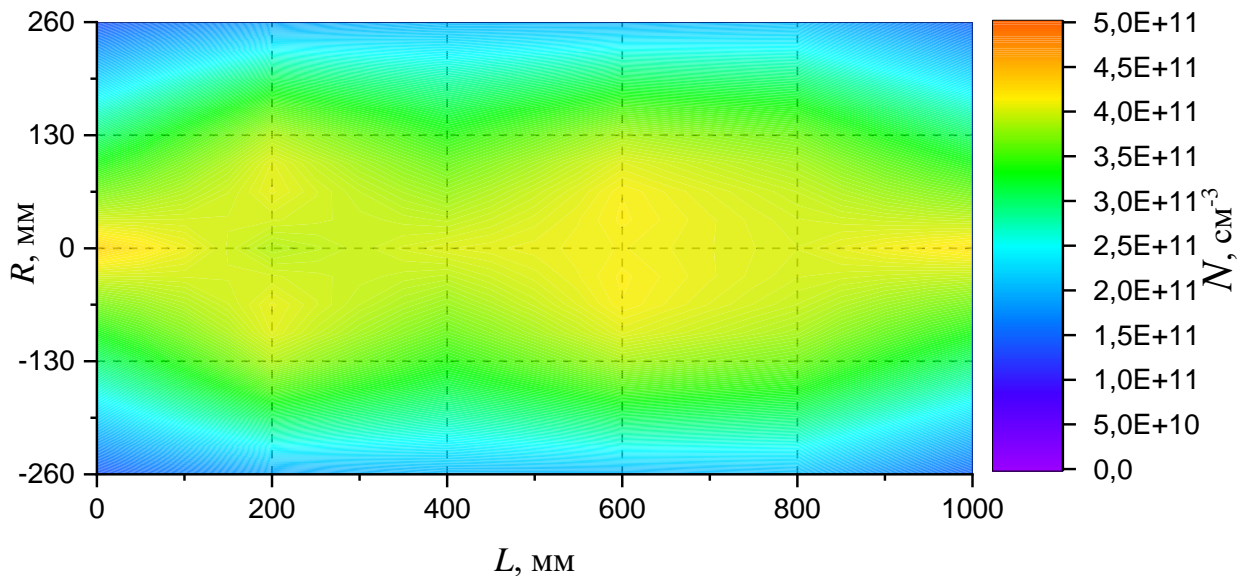


Рисунок 2.16 – Сумма распределений концентрации заряженных частиц 1 и 2, полученных при токах дугового разряда 20 А (режим 4)

Распределение (режим 4), полученное в результате суммы распределений 1 и 2, идентично по форме с экспериментальным (режим 3). Для сравнения между собой полученных распределений концентрации плазмы при токах дугового разряда 20 А в радиальном и продольном направлениях были рассчитаны

коэффициенты неоднородности концентрации плазмы k_N для каждой точки, рассчитанной по результатам зондовых измерений (таблицы 2.5, 2.6).

Таблица 2.5 – Радиальное распределение коэффициента неоднородности концентрации плазмы k_N

L , мм	0	200	400	600	800	1000
Режим 1	63%	42%	34%	39%	39%	11%
Режим 2	25%	45%	39%	44%	42%	53%
Режим 3	52%	40%	29%	37%	37%	43%
Режим 4	52%	45%	37%	42%	38%	48%

Таблица 2.6 – Продольное распределение коэффициента неоднородности концентрации плазмы k_N

R , мм	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
0	100%	87%	14%	6%
130	80%	81%	8%	15%
260	70%	75%	25%	26%

Максимальное численное отклонение значений концентраций плазмы для режимов 3 и 4 составляет около 20% и наблюдается на продольной оси полого катода. Принцип суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц в продольном направлении выполняется с точностью не хуже 8 % и наблюдается на оси полого катода тлеющего разряда.

Далее токи вспомогательного дугового разряда были увеличены с 20 А до 45 А. На рисунке 2.17 представлено распределение концентрации плазмы при включении источника электронов № 1 с током вспомогательного дугового разряда 45 А (режим 5). Ток инжекции в полый катод тлеющего разряда в этом случае составляет чуть более 20 А.

Распределение концентрации заряженных частиц (режим 5) в данном случае имеет схожий характер с режимом 1, однако величина концентрации заряженных частиц увеличилась примерно в два раза. На рисунке 2.18 представлено распределение концентрации заряженных частиц при включении инжектора электронов № 2 при токе дугового разряда 45 А (режим 6).

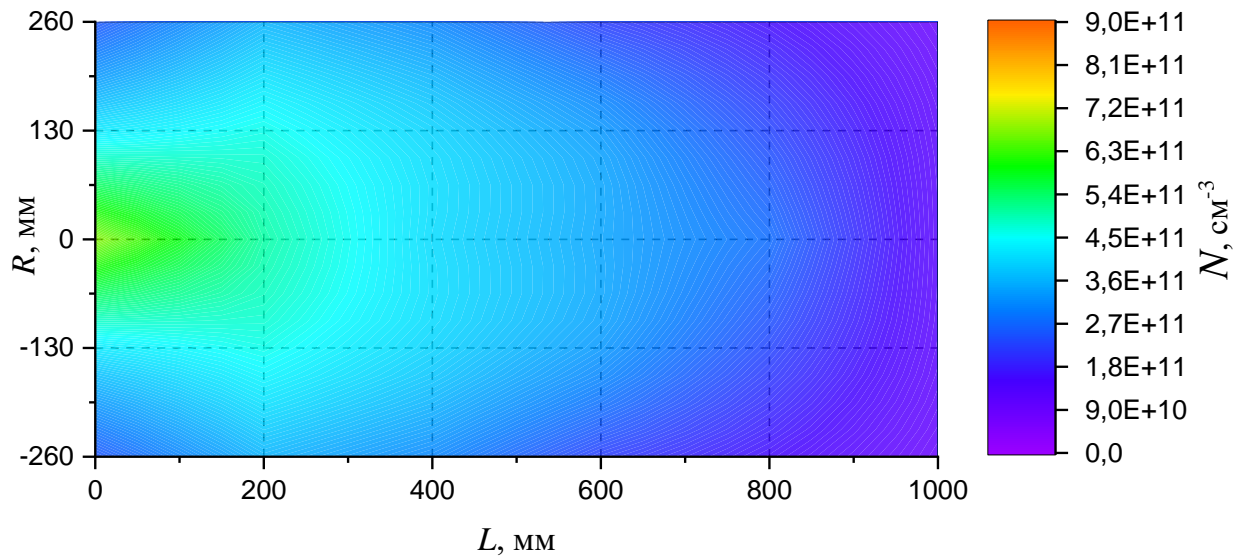


Рисунок 2.17 – Распределение концентрации плазмы при включении инжектора электронов № 1 при токе вспомогательного дугового разряда 45 А (режим 5)

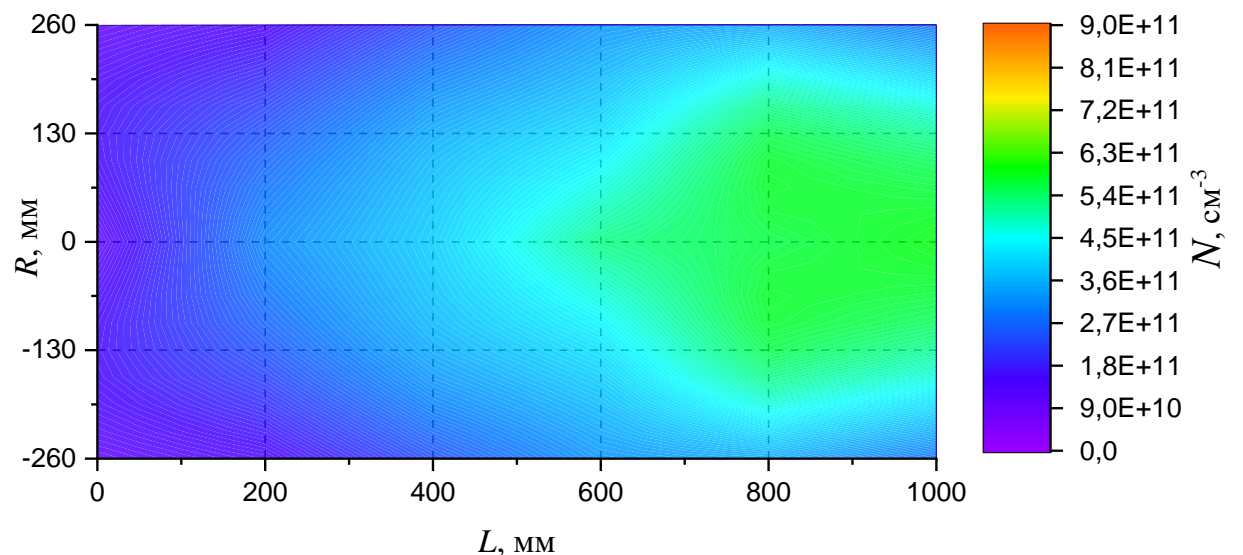


Рисунок 2.18 – Распределение концентрации заряженных частиц при включении инжектора электронов № 2 при токе вспомогательного дугового разряда 45 А (режим 6)

Несимметричность распределений концентрации плазмы, полученных при включении инжекторов электронов № 1 и № 2, связана с несимметричностью электродной системы. На рисунке 2.19 представлено распределение концентрации плазмы при совместном включении инжекторов электронов № 1 и № 2 при токах дугового разряда 45 А (режим 7).

При включении двух инжекторов электронов по 45 А коэффициент неоднородности в продольном направлении на всех радиусах не превышает 8 %.

На рисунке 2.20 представлено распределение концентрации заряженных частиц (режим 8), полученное суммированием распределений по режимам 5 и 6.

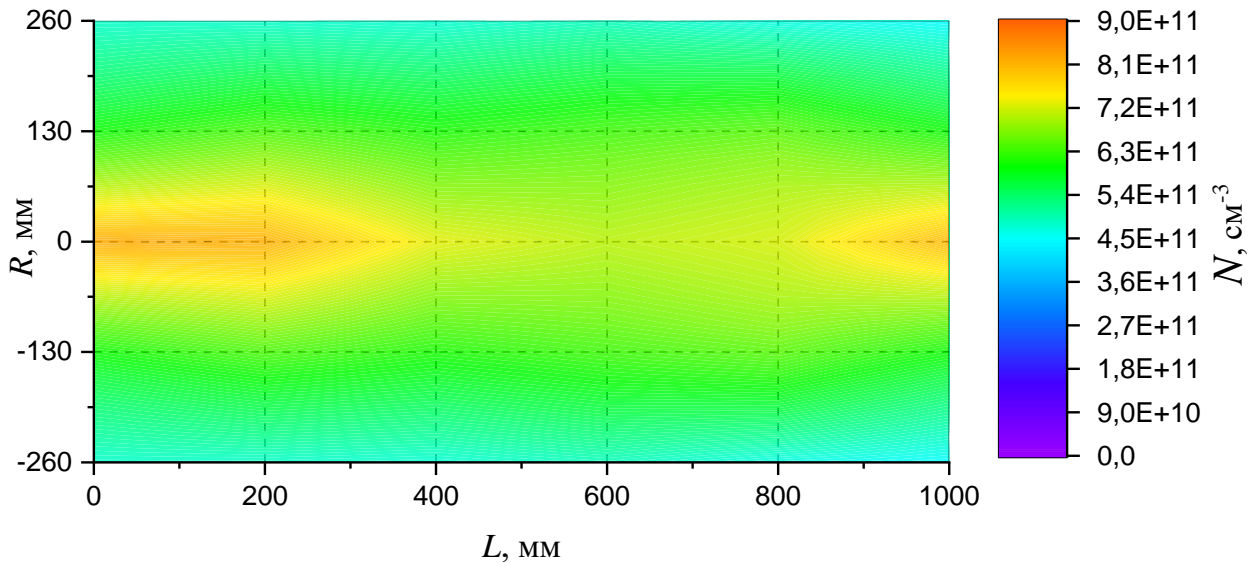


Рисунок 2.19 – Распределение концентрации плазмы при совместном включении инжекторов электронов № 1 и № 2 при токах вспомогательного дугового разряда 45 А (режим 7)

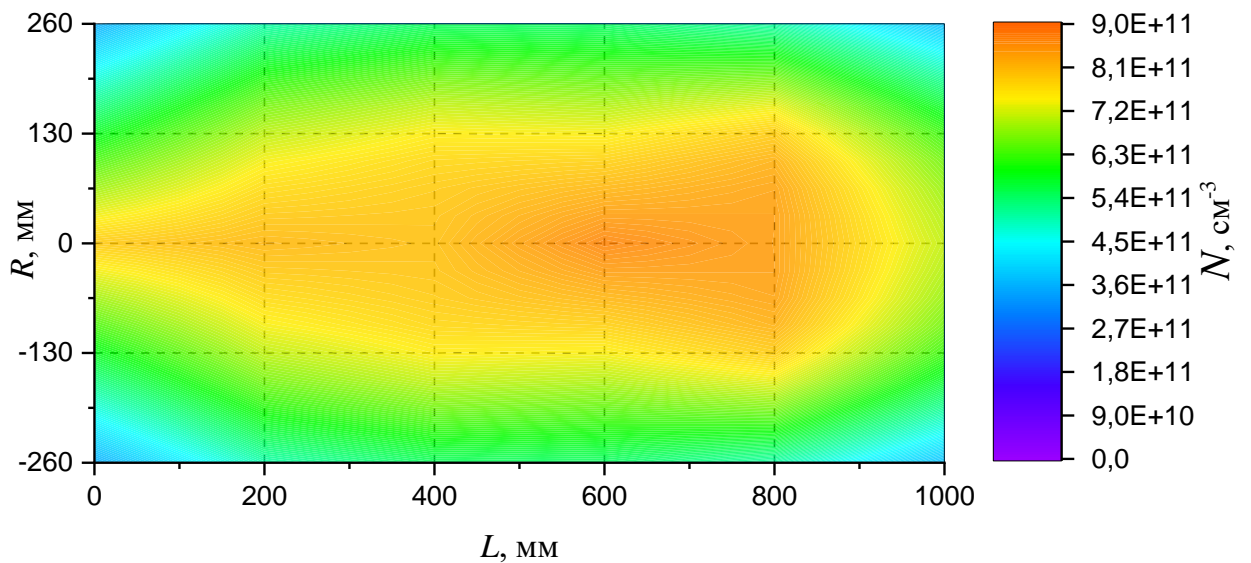


Рисунок 2.20 – Сумма распределений концентрации заряженных частиц по режимам 5 и 6 (режим 8)

Для сравнения между собой полученных распределений концентрации заряженных частиц при токах дугового разряда 45 А в продольном и радиальном направлениях были рассчитаны коэффициенты неоднородности плазмы k_N для каждой точки, рассчитанной по результатам зондовых измерений (таблицы 2.7, 2.8).

Таблица 2.7 – Радиальное распределение коэффициента неоднородности концентрации плазмы k_N

L , мм	0	200	400	600	800	1000
Режим 5	58%	19%	19%	28%	28%	17%
Режим 6	23%	40%	28%	27%	32%	40%
Режим 7	34%	29%	22%	20%	25%	34%
Режим 8	40%	26%	23%	24%	31%	36%

Таблица 2.8 – Продольное распределение коэффициента неоднородности концентрации плазмы k_N

R , мм	Режим 5	Режим 6	Режим 7	Режим 8
0	75%	74%	8%	12%
130	66%	58%	4%	18%
260	62%	57%	5%	27%

Максимальное отклонение значений концентрации заряженных частиц для режимов 7 и 8 составляет около 26 % и наблюдается в области геометрической тени для инжектируемых электронов. При включении двух инжекторов электронов с токами вспомогательного дугового разряда 45 А разница между суммарным распределением концентрации плазмы в продольном направлении (режим 8) и экспериментальным (режим 7) в продольном направлении увеличивается по сравнению со случаем включения двух источников электронов с токами дугового разряда 20 А (режим 4 и режим 3 соответственно) и составляет 22 %.

Дополнительные исследования показали, что при увеличении тока вспомогательного дугового разряда с 20 А до 45 А и концентрации плазмы примерно в 2 раза, от $\approx 3,5 \cdot 10^{11}$ до $\approx 7 \cdot 10^{11}$ см⁻³, распределение потенциала плазмы становится более неоднородным. На рисунке 2.21 представлено распределение потенциала плазмы при совместной работе двух инжекторов электронов с токами 20 А и 45 А (режим 3 и режим 7 соответственно).

Значения коэффициентов неоднородности распределения потенциала плазмы в продольном и поперечном направлениях для токов дугового разряда 20 А и 45 А приведены в таблицах 2.9 и 2.10.

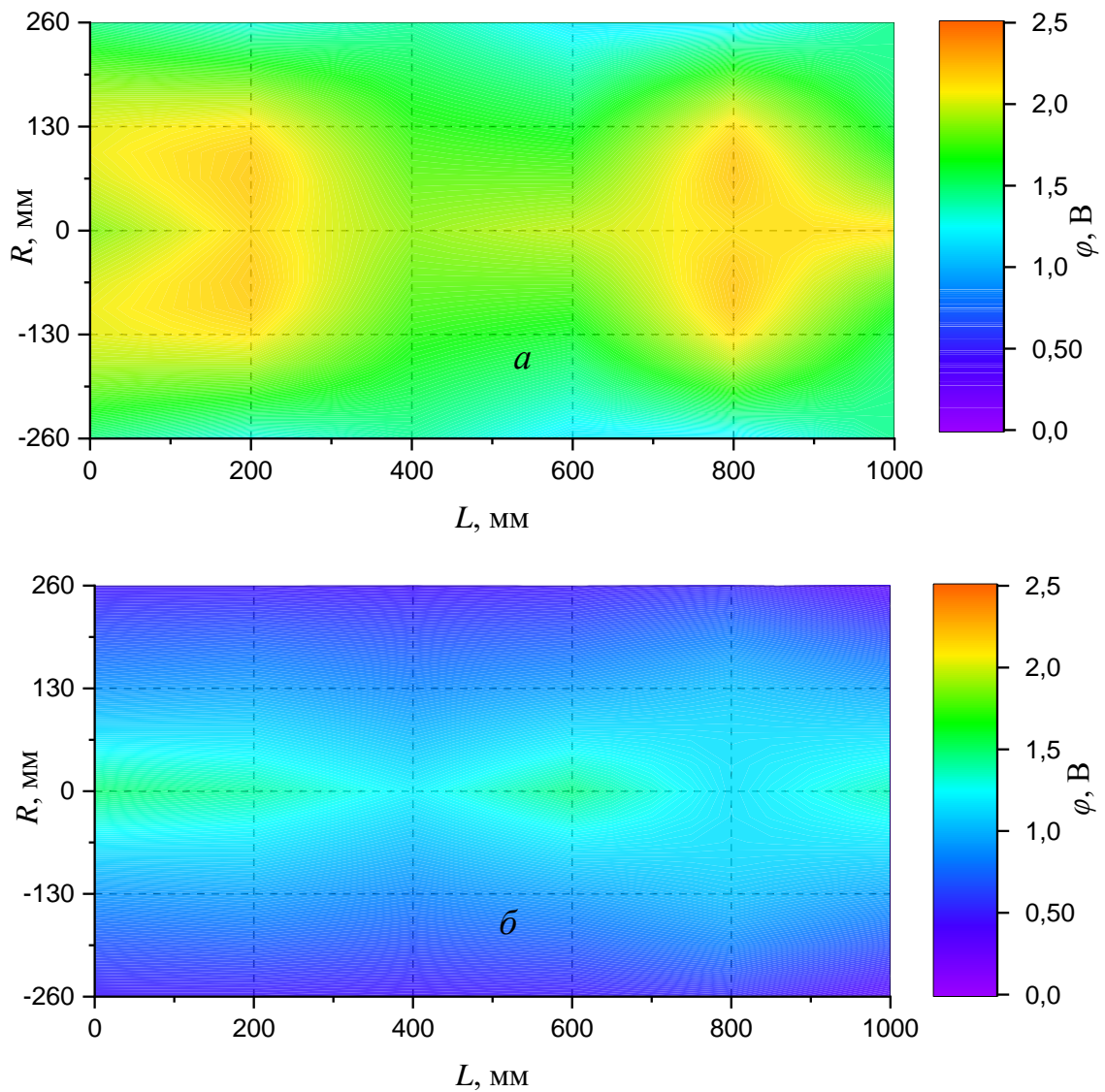


Рисунок 2.21 – Распределение потенциала плазмы при токах вспомогательного дугового разряда 20 А (режим 3) (а); при токах дугового разряда 45 А (режим 7) (б)

Таблица 2.9 – Радиальное распределение коэффициента неоднородности потенциала плазмы k_ϕ

L , мм	0 мм	200 мм	400 мм	600 мм	800 мм	1000 мм
Режим 3	21%	33%	15%	25%	38%	29%
Режим 7	64%	53%	48%	57%	44%	61%

Таблица 2.10 – Продольное распределение коэффициента неоднородности потенциала плазмы k_ϕ

R , мм	Режим 3	Режим 7
0	8%	13%
130	15%	12%
260	12%	26%

В среднем градиент потенциала плазмы, наблюдаемый в основном в поперечном направлении и в меньшей степени в продольном, для режима 3 составляет примерно 0,7 В, а для режима 7 – 1,4 В. Поперечный градиент потенциала плазмы приводит к направленному движению низкоэнергетических электронов в сторону увеличения потенциала, увеличивая подвижность и коэффициент диффузии электронов как в поперечном, так в некоторой степени в продольном направлении.

В дополнение к полученным результатам для определения роли повышенного значения концентрации заряженных частиц в пучково-плазменном образовании были рассчитаны карты распределений длин свободного пробега электронов между кулоновскими взаимодействиями.

На рисунке 2.22 представлены распределения рассчитанного по полученным данным значения длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями при токах дугового разряда 20 А и 45 А (режим 3 и режим 7 соответственно).

Значения коэффициентов неоднородности распределения значения длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями в продольном и поперечном направлениях для токов дугового разряда 20 А и 45 А приведены в таблицах 2.11, 2.12.

При сравнении двух распределений видно, что значения длины свободного пробега электрона между кулоновскими (электрон-электронными и электрон-ионными столкновениями) взаимодействиями при токах дугового разряда 45 А существенно ниже, её величина мало изменяется по объёму полого катода. Уменьшение длины свободного пробега между кулоновскими взаимодействиями приводит к более частому изменению траектории движения заряженных частиц и как следствие к снижению степени неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в полой катоде тлеющего разряда.

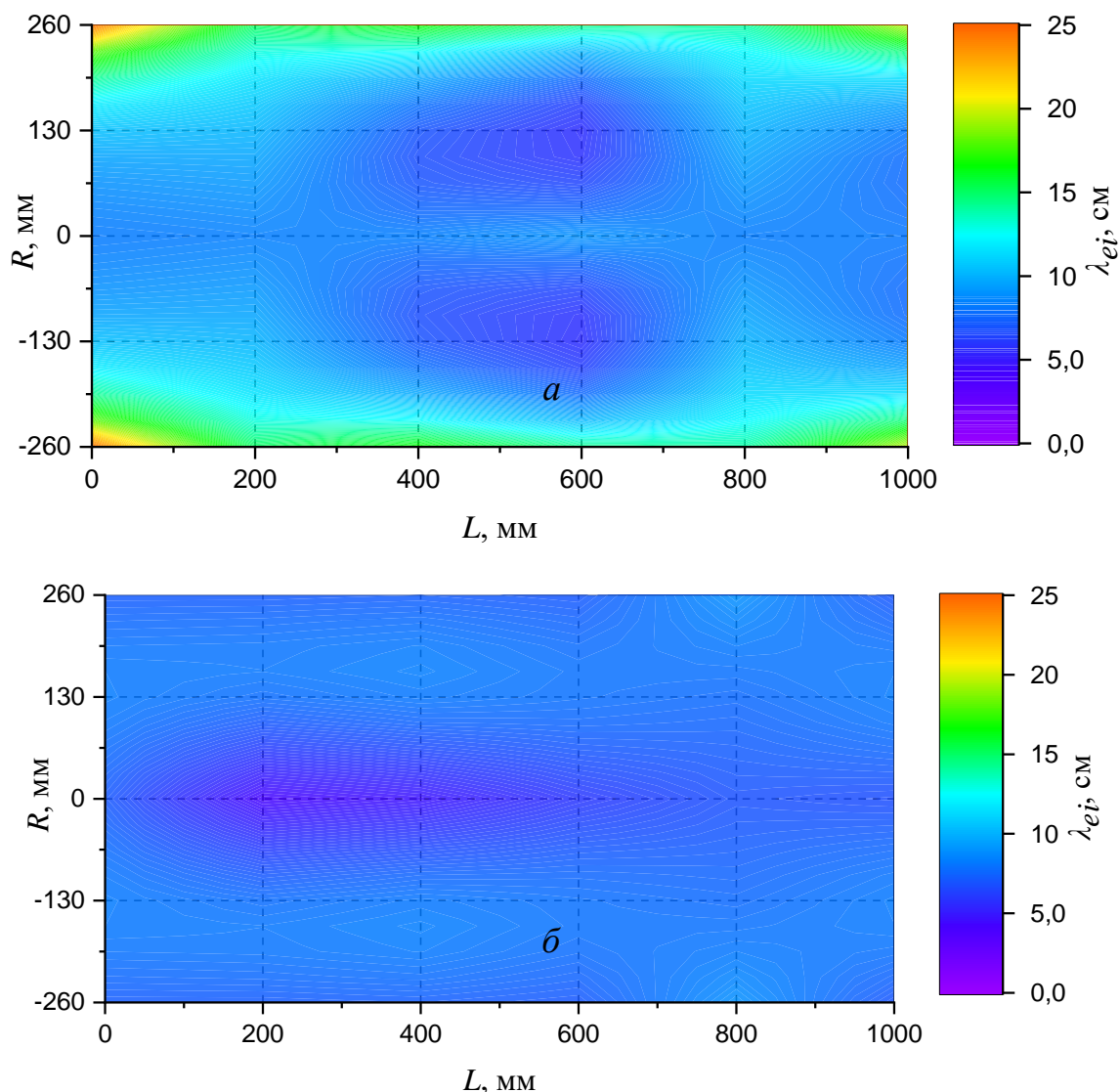


Рисунок 2.22 – Распределения значения длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями: *a* – при токах дугового разряда 20 А; *б* – при токах дугового разряда 45 А

Таблица 2.11 – Радиальное распределение коэффициента неоднородности длины свободного пробега между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei}

L , мм	0	200	400	600	800	1000
Режим 3	90%	39%	79%	79%	32%	84%
Режим 7	9%	39%	35%	19%	15%	12%

Таблица 2.12 – Продольное распределения коэффициента неоднородности длины свободного пробега между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei}

R , мм	Режим 3	Режим 7
0	7%	27%
130	33%	4%
260	48%	20%

Выводы к главе 2

В осесимметричной цилиндрической системе генерации пучково-плазменных образований на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с двумя инжекторами электронов, расположенными на торцах полого катода, с достаточно высокой точностью действует принцип суперпозиции в отношении зависимостей тока тлеющего разряда от тока вспомогательного дугового разряда (тока инъекции электронов). Отклонение эмиссионных характеристик, полученных в ходе эксперимента, от эмиссионных характеристик, полученных в результате арифметического сложения, составляет не более 15 % для импульсного режима горения и не более 10% для постоянного режима.

При исследовании распределений концентрации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях показано, что при токах тлеющего разряда до 200 А принцип суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц выполняется с точностью не хуже 22%.

При повышении токов вспомогательного дугового разряда с 20 до 45 А в источниках электронов точность выполнения принципа суперпозиции снижается, что связано с повышением концентрации заряженных частиц, повышением поперечного градиента потенциала плазмы и, соответственно, коэффициента подвижности электронов в поперечном направлении в полном катоде, а также повышенным влиянием кулоновских взаимодействий. В случае арифметического сложения распределений концентрации заряженных частиц, полученных при отдельной работе инжекторов электронов при относительно низких, до ≈ 100 А токах тлеющего разряда, учитываются свойства пучково-плазменных образований со значительно (кратно) более низкой степенью ионизации. Это приводит к возрастанию рассогласования экспериментального и суммарного распределений при увеличении тока инъекции и, соответственно, тока тлеющего разряда и концентрации заряженных частиц.

Так, при включении двух инжекторов электронов с токами 20 А максимальное отклонение коэффициентов неоднородности при сравнении режимов 3 и 4 составило 8%. При включении двух инжекторов электронов с токами 45 А максимальное отклонение коэффициентов неоднородности при сравнении режимов 7 и 8 составило 22%.

Результаты исследований закономерностей генерации объёмно-однородных ППО, представленных в настоящей главе, приведены в работах автора [82–92].

Глава 3. Сильноточный несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом с инжекцией электронов из протяженного цилиндрического эмиттера

В данной главе представлен оригинальный генератор газовых ППО на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с инжекцией электронов из протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера. Во многих существующих ионно-плазменных установках отсутствует возможность установки двух и более инжекторов электронов. Задача генерации объемно-однородного пучково-плазменного образования решается использованием эмиссионного электрода протяженной формы. Располагая протяженный сетчатый эмиттер соосно с полым катодом основного тлеющего разряда и обеспечивая равномерность плотности потока по длине радиально расходящегося пучка электронов из плазменного эмиттера, реализуется возможность получения протяженного пучково-плазменного образования в тлеющем разряде с низкой степенью неоднородности.

3.1 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 3.1. Генератор ППО собран на базе цилиндрической вакуумной камеры высотой 1200 мм, диаметром 600 мм и объёмом около $0,34 \text{ м}^3$. Вакуумная камера откачивалась до давления около $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ турбомолекулярным насосом. В качестве источника вспомогательной плазмы, из которой извлекались электроны, инжектируемые в основной тлеющий разряд, использовался дуговой разряд с холодным полым катодом и протяжённым (около 1 м длиной) полым сетчатым цилиндрическим анодом. При этом электроды дугового разряда располагались на нижнем основании камеры. Размер ячейки сетки полого анода составлял $0,4 \times 0,4 \text{ мм}$ с геометрической прозрачностью около 45 %. Вспомогательный дуговой разряд инициировался пробоем по поверхности диэлектрика и горел между полым катодом дугового

разряда и полым сетчатым анодом, который находился под потенциалом полого катода основного тлеющего разряда. Часть радиально расходящегося потока электронов, эмитируемых из плазмы дугового разряда, попадала сквозь ячейки сетки в область прикатодного падения потенциала тлеющего разряда, ускорялась в нем и осциллировала в полном катоде, генерируя плазму [93].

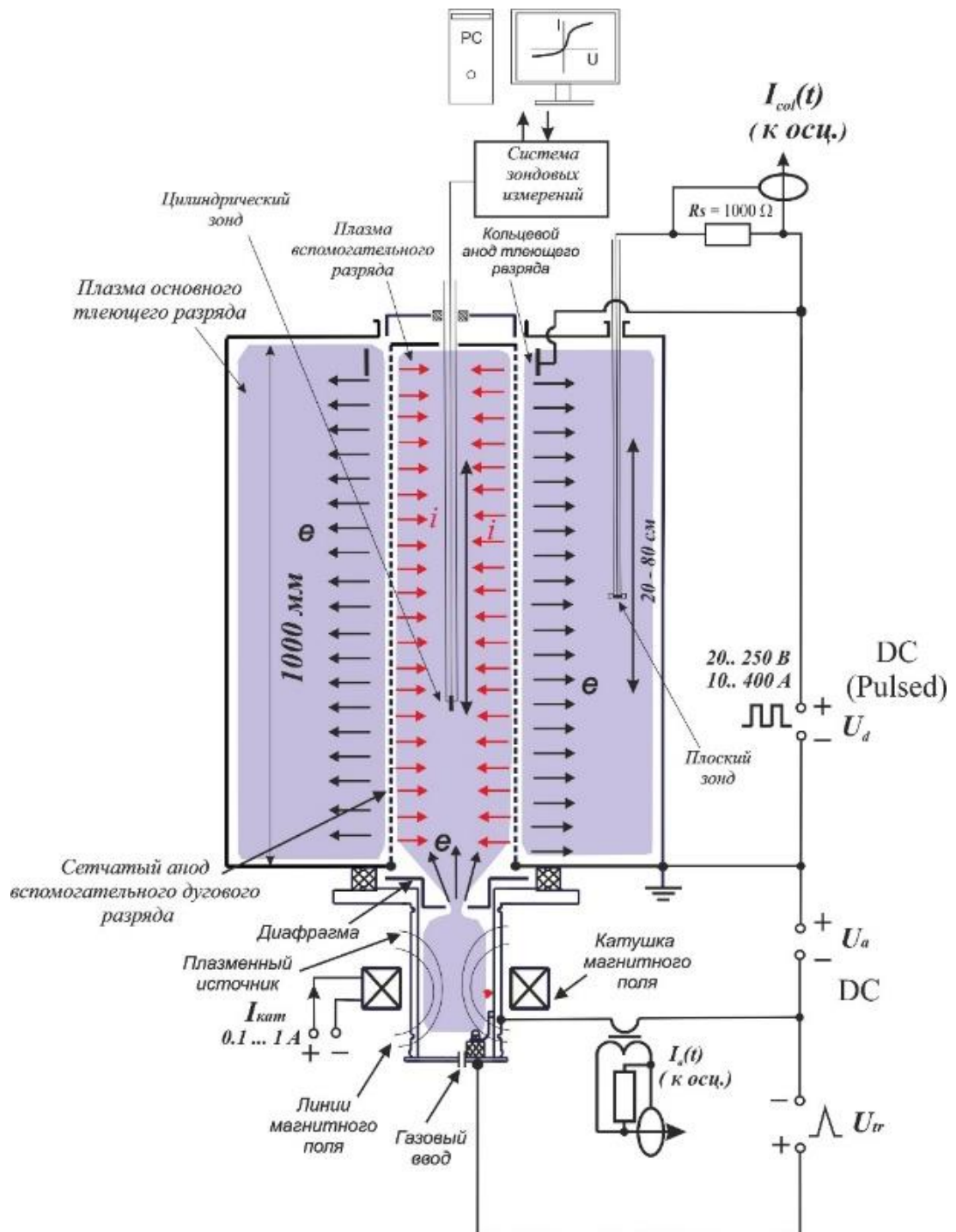


Рисунок 3.1 – Схема экспериментального стенда для генерации пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде

Использование одной дуговой ячейки обусловлено отсутствием на большинстве вакуумных ионно-плазменных установок посадочного места для второй дуговой ячейки. Разработка и реализация конструктивных и схемных решений по внедрению второго плазмогенератора без отведенного для него посадочного места на вакуумной камере влечет за собой ряд технологических сложностей и финансовых расходов, что значительно увеличивает затраты на изготовление и последующую эксплуатацию.

Тлеющий разряд зажигался между полым катодом тлеющего разряда, роль которого выполняли стенки вакуумной камеры, и кольцевым анодом. Соотношение площадей анода и катода составляло $S_a : S_c = 1 : 50$. Для исследования распределения параметров дуговой плазмы в полом сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда вдоль его оси использовался цилиндрический зонд Ленгмюра.

Для исследования распределения концентрации плазмы и плотности ионного тока внутри полого катода основного несамостоятельного тлеющего разряда вдоль его продольной оси использовался плоский зонд с охранным кольцом. Электропитание тлеющего разряда осуществлялось от источника электропитания с параметрами: амплитуда напряжения 30–300 В, импульсный ток 1–550 А при среднем токе до 120 А, максимальная средняя мощность 30 кВт, частота следования импульсов 1–1000 Гц, коэффициент заполнения импульсов 1–100 %. На выходе источника питания тлеющего разряда была установлена конденсаторная батарея с емкостью 7,2 мФ. Источник питания снабжен системой дугогашения. Во всех экспериментах несамостоятельный тлеющий разряд горел в квазистационарном режиме, все измерения проводились при частоте следования импульсов $f = 38$ Гц на третьей миллисекунде разрядного импульса (см. рисунок 2.2).

Описываемый генератор протяженных ППО разрабатывался для ионно-плазменной обработки поверхности крупногабаритных протяжённых изделий (азотирование, напыление, активация поверхности). В силу конструктивных особенностей крепления и установки обрабатываемых изделий область

пространства, примыкающая к нижнему основанию (на высоту до 200 мм) внутри вакуумной камеры, как правило, занимает оснастка. Фотография стенда приведена на рисунке 3.2.

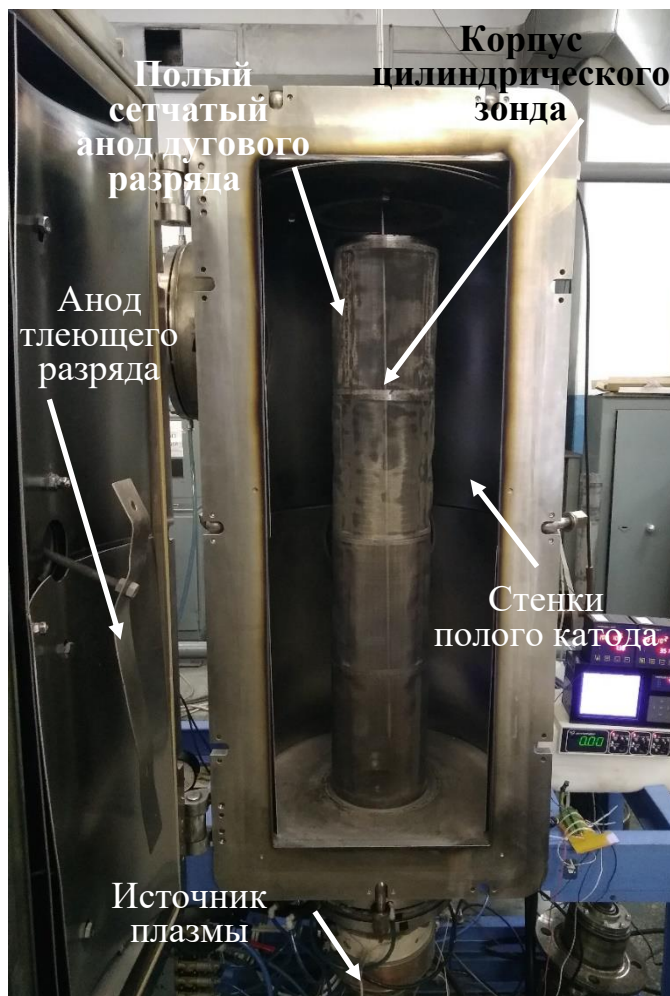


Рисунок 3.2 – Вакуумная камера экспериментального стенда и одиночный цилиндрический зонд

Азотирование можно проводить как в среде чистого азота, так и в смеси азота с аргоном. В работе [94] было показано, что в среде смеси аргона и азота с процентным содержанием $N_2(10\%)$ и $Ar(90\%)$ после азотирования у конструкционной стали марки Х12МФ снижается коэффициент трения и износа. В связи с этим стала актуальной задача получения однородного распределения ППО в среде аргона или в смеси аргона с небольшой добавкой азота, и проводились соответствующие эксперименты.

3.2 Характеристики разряда в импульсном режиме горения

В ходе исследований использовались два протяженных сетчатых анода дугового разряда длиной около 1000 мм и диаметрами 115 мм и 200 мм, боковые стенки которых были перекрыты мелкоструктурной сеткой с размерами ячейки сетки 0,4×0,4 мм. Варьируемыми параметрами вспомогательного дугового разряда являлись ток дугового разряда, давление, род газа (N_2 или Ar). На рисунке 3.3 приведена фотография свечения пучково-плазменного образования при напряжении горения тлеющего разряда $U_{\text{тл}} = 150$ В, токе вспомогательного дугового разряда $I_{\text{д}} = 50$ А в атмосфере азота при давлении 0,15 Па.

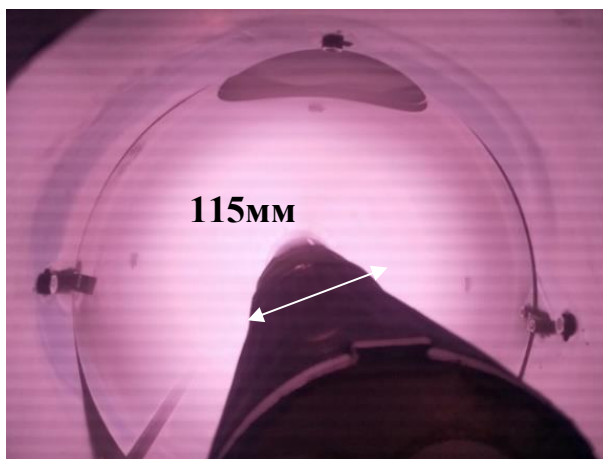


Рисунок 3.3 – Свечение плазмы тлеющего разряда с протяженным сетчатым плазменным эмиттером электронов диаметром 115 мм

При исследовании влияния рабочего давления на степень продольной неоднородности плотности ионного тока из плазмы вспомогательного разряда в полем сетчатым аноде были получены зависимости, представленные на рисунках 3.4 и 3.5. При отсутствии основного тлеющего разряда и, соответственно, потока ионов из плазмы основного тлеющего разряда внутрь полого анода через ячейки сетки распределение плотности ионного тока имеет неоднородный характер и максимальное значение плотности ионного тока на зонд наблюдается в области выходной апертуры ячейки дугового разряда с катодным пятном.

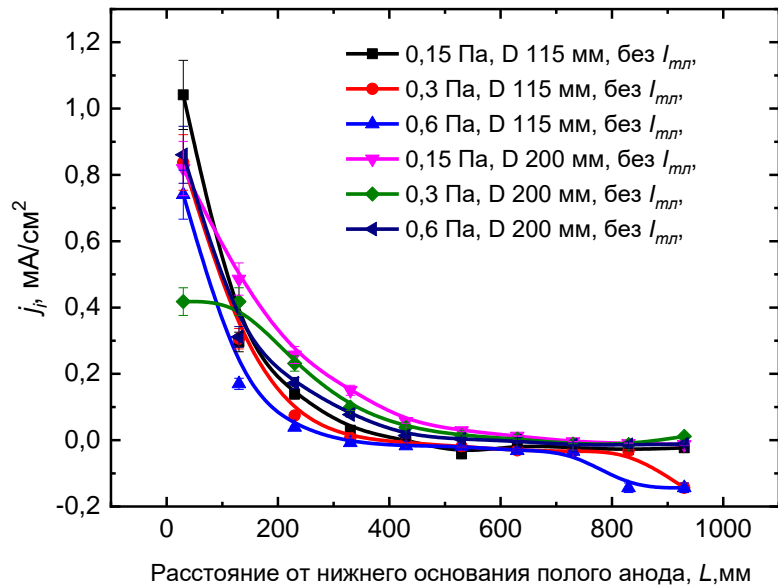


Рисунок 3.4 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль оси полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере азота (0 – плоскость нижнего основания полого катода) без тлеющего разряда при $I_d = 50$ А

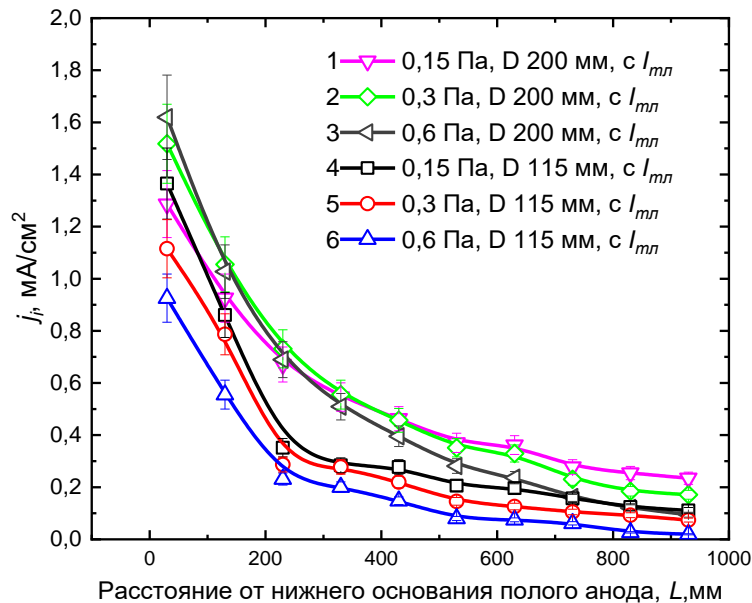


Рисунок 3.5 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере азота (0 – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом при $I_d = 50$ А, $U_{тл} = 150$ В

Плотность ионного тока спадает почти до нуля на расстоянии 500 мм. Увеличение диаметра полого анода с 115 мм до 200 мм позволяет на 40% снизить степень неоднородности распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда. Для обоих диаметров полого анода снижение рабочего давления приводит к снижению степени неоднородности. При

зажигании тлеющего разряда с напряжением горения $U_{\text{тл}} = 150$ В (см. рисунок 3.5) плазма формируется на всем протяжении полого анода, а плотность ионного тока из плазмы значительно, примерно в 1,5 раза, возрастает по сравнению со случаем без зажигания тлеющего разряда. Минимальная степень неоднородности продольного распределения плотности ионного тока при токе дугового разряда $I_{\text{д}} = 50$ А в среде азота достигается при диаметре 200 мм, давлении азота 0,15 Па и составляет 140%.

В таблице 3.1 приведены коэффициенты неоднородности k_j для каждого распределения, представленного на рисунке 3.5.

Таблица 3.1

Номер распределения	1	2	3	4	5	6
$k_j, \%$	140	170	215	245	245	300

Исследования распределений плотности ионного тока в атмосфере аргона при напряжении горения тлеющего разряда 150 В, представленные на рисунке 3.6, показывают ту же закономерность: при снижении давления степень неоднородности снижается.

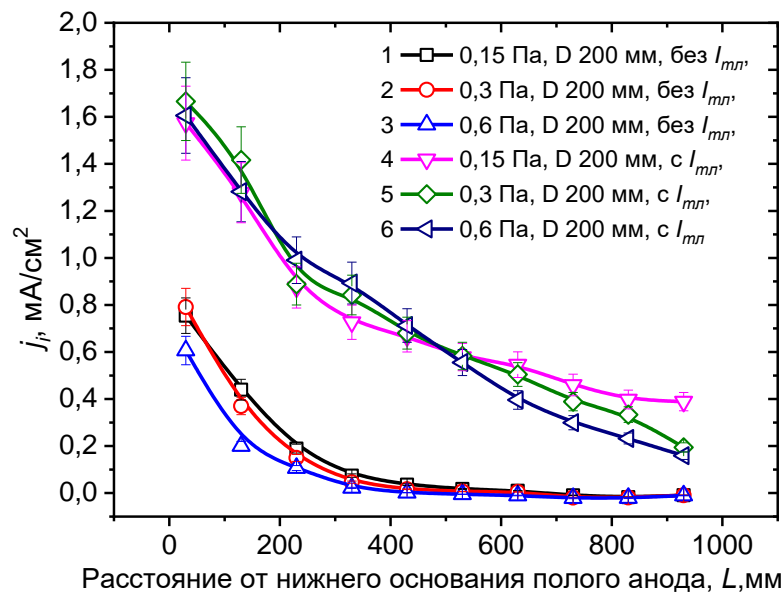


Рисунок 3.6 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере аргона (0 – плоскость нижнего основания полого катода) при $I_{\text{д}} = 50$ А, $U_{\text{тл}} = 150$ В

В таблице 3.2 приведены коэффициенты неоднородности k_j для каждого распределения, представленного на рисунке 3.6.

Таблица 3.2

Номер распределения	1	2	3	4	5	6
$k_j, \%$	410	490	600	110	120	125

Увеличение напряжения горения тлеющего разряда со 150 В до 200 В в азоте при идентичном значении тока вспомогательного дугового разряда 50 А, диаметре полого анода $D = 200$ мм приводит к пропорциональному увеличению тока тлеющего разряда и, соответственно, к увеличению ионного тока в эмиттер электронов через ячейки сетки. Это влечет за собой увеличение плотности ионного тока на зонд, а также концентрации плазмы, снижение коэффициента неоднородности распределения концентрации плазмы, что и демонстрируют полученные зависимости (рисунок 3.7).

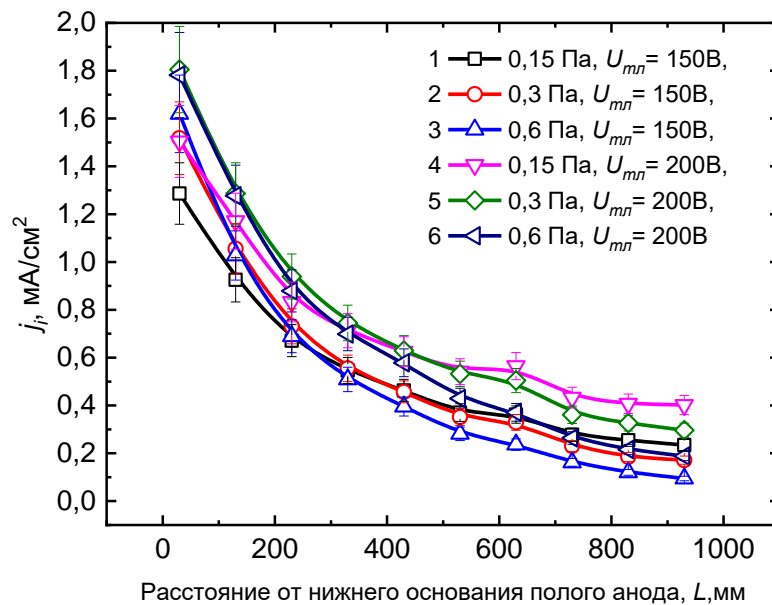


Рисунок 3.7 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере азота (0 – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом при $I_d = 50$ А, $D = 200$ мм

В таблице 3.3 приведены коэффициенты неоднородности для каждого распределения, представленного на рисунке 3.7.

Таблица 3.3

Номер распределения	1	2	3	4	5	6
$k_j, \%$	140	170	215	110	145	165

Необходимо отметить, что повышение тока дугового разряда при напряжении горения несамостоятельного тлеющего разряда 150 В с 50 А до 100 А при напуске аргона либо азота приводит к небольшому увеличению неоднородности (рисунок 3.8).

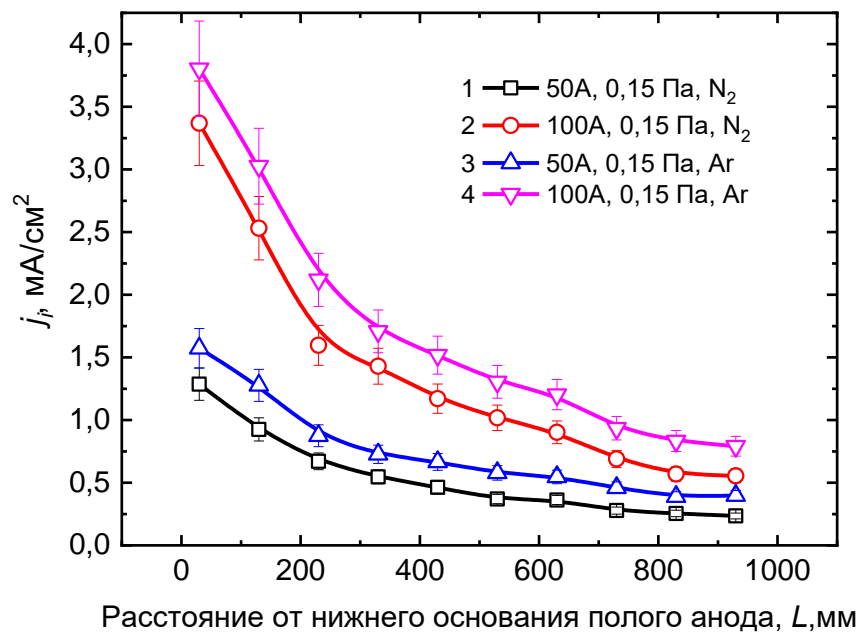


Рисунок 3.8 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда (0 – плоскость нижнего основания полого катода) при $U_{гл} = 150$ В, $D = 200$ мм

В таблице 3.4 приведены коэффициенты для каждого распределения, представленного на рисунке 3.8.

Таблица 3.4

Номер распределения	1	2	3	4
$k_j, \%$	140	145	110	120

В основном увеличение неоднородности вызвано ростом концентрации плазмы в области малых расстояний L за счет замыкания тока дугового разряда на

участки сетчатого полого анода, лежащие вблизи выходной апертуры источника дуговой плазмы.

Результаты экспериментов, представленные выше, показывают, что увеличение диаметра цилиндрического сетчатого анода приводит к снижению степени неоднородности распределения плотности ионного тока. На однородность распределения плотности ионного тока влияет также коэффициент заполнения импульса несамостоятельного тлеющего разряда γ (рисунок 3.9).

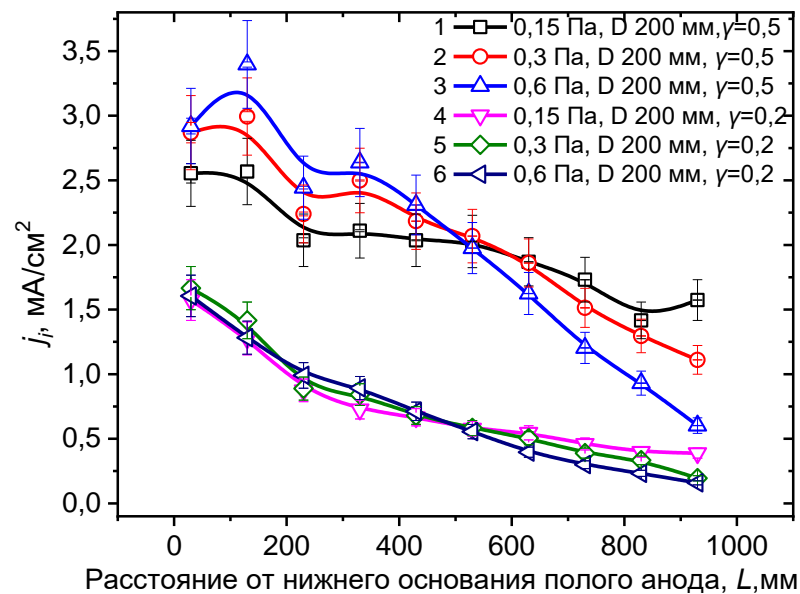


Рисунок 3.9 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере аргона (0 – плоскость нижнего основания полого катода) при $I_d = 50$ А, $U_{пл} = 200$ В

В таблице 3.5 приведены коэффициенты для каждого распределения, представленного на рисунке 3.9.

Таблица 3.5

Номер распределения	1	2	3	4	5	6
$k_j, \%$	30	45	70	110	120	125

Влияние коэффициента заполнения импульса на однородность распределения плотности ионного тока можно объяснить тем, что с его увеличением с 0,2 до 0,5 происходит наработка заряженных частиц в полом катоде

тлеющего разряда и повышается плотность потока ионов, инжектируемых из ППО тлеющего разряда в протяженный цилиндрический сетчатый анод.

Для более детального рассмотрения влияния потока ионов на снижение степени неоднородности распределения плотности ионного тока проводилось численное моделирование процессов в полном сетчатом аноде с применением метода крупных частиц [95]. На рисунке 3.10 представлена конфигурация аксиально-симметричной счетной области.

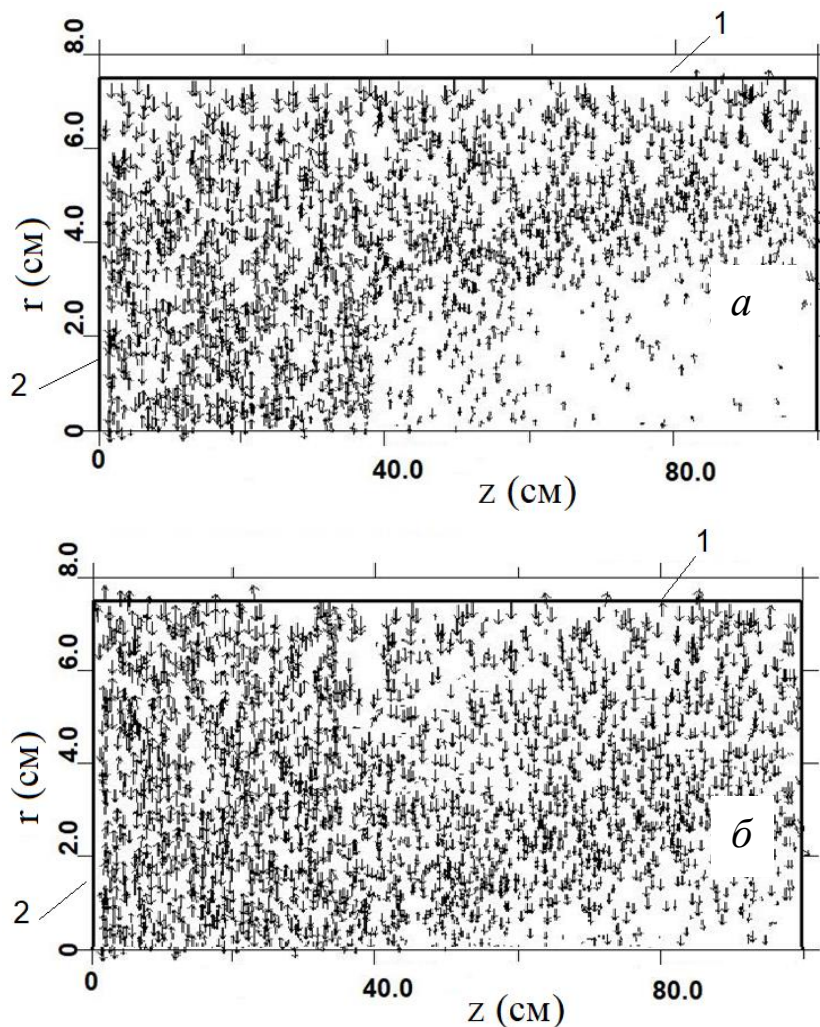


Рисунок 3.10 – Расчетная область цилиндрического полого анода и конфигурационный портрет векторов скоростей ионов: 1 – граница инжекции ионов; 2 – граница источника плазмы дугового разряда; а – $t = 3$ мкс; б – $t = 4$ мкс
(Т.В. Коваль. Частное сообщение)

Через боковую границу цилиндрического анода 1 в направлении оси симметрии инжектируются ионы (с начальной энергией W и током I_b) в эквипотенциальное пространство (пространство дрейфа) с неоднородным

распределением плазмы. Источник плазмы (дугового разряда) находится на левом торце полого анода, плотность ионного тока инжекции однородная.

В модели используются 7 сортов РИС-частиц: плазменные РИС-электроны с температурой 5 эВ и РИС-ионы; РИС-ионы пучка с энергией ионов W , возникающие в процессе ионизации газа (азот); плазменные частицы РИС-ионы и РИС-электроны; РИС-электроны внешнего источника и РИС-электроны, возникающие за счет ионно-электронной эмиссии с границ расчетной области. Коэффициент ионно-электронной эмиссии, согласно литературным данным, был принят $\mu = 0,05$ при $W = 150\text{--}200$ эВ, концентрация газа $1,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³.

В расчете начальное распределение концентрации плазмы в полом аноде определяется внешним источником и задается в соответствии с измеряемой в эксперименте плотностью ионного тока (см. рисунки 3.4, 3.5). При инжекции ионов из плазмы основного тлеющего разряда к оси симметрии цилиндрического анода происходит их баллистическая фокусировка, при которой плотность положительного заряда быстрых ионов возрастает как $1/r$ (обратно пропорционально расстоянию до оси симметрии). Неоднородное распределение концентрации плазмы дугового разряда определяет разные условия транспортировки инжектируемых с боковой границы ионов. В области $z < 40$ см (область I) концентрация плазмы n_{pl} значительно превышает концентрацию быстрых ионов; зарядовая компенсация быстрых ионов электронами, эмитируемыми из вспомогательного разряда, позволяет им проходить все пространство дрейфа (сечение цилиндра) (см. рисунок 3.10).

В условиях эксперимента в результате столкновений с атомами газа ионы превращаются в быстрые нейтральные атомы (перезарядка) [96]. Согласно литературным данным при энергии ионов 150–200 эВ сечение перезарядки ионов аргона $\sigma_{ex} = 3,5 \cdot 10^{-15}$ см² [97, 98]. При давлении 0,15–0,6 Па концентрация атомов газа $n_g = (0,4\text{--}1,6) \cdot 10^{14}$ см⁻³. Средняя длина свободного пробега иона при перезарядке ионов аргона рассчитывается по формуле

$$\lambda_i = \frac{1}{n_g \sigma_{ex}} \quad (3.1)$$

и равна 7–1,7 см.

Изменение концентрации плазмы Δn_1 за счет перезарядки быстрых ионов пропорционально концентрации быстрых ионов n_b и длительности импульса тока разряда τ : $\Delta n_1 \sim n_b \tau$.

В области II при $z > 40$ см недостаточное количество плазменных электронов обуславливает увеличение положительного потенциала U , торможение ионов и их отражение при $W = eU$ (формирование виртуального анода). При формировании виртуального анода ионизация газа плазменными и вторичными (за счет ионно-электронной эмиссии с поверхности сеточного анода) электронами, ускоренными в потенциальном поле ионного пучка, является одним из механизмов формирования плазменного образования в области II. Время формирования ионно-пучковой плазмы и ее концентрация зависят от давления газа, плотности тока ионов и их энергии. На рисунке 3.10 показаны конфигурационные портреты векторов скоростей в последовательные моменты времени, которые отражают динамику формирования пучковой плазмы (пучком инжектируемых ионов). В расчетах плотность инжектируемого ионного тока 0,13 мА/см².

На рисунке 3.11 показано установившееся распределение плотности плазменных электронов на разных радиусах полого анода и начальное распределение плотности плазмы (кривая 3). При инжекции ионного пучка неоднородность распределения плазмы сохраняется.

Результаты численного моделирования отражают основные закономерности и механизм формирования ППО в полном сетчатом аноде дугового разряда. С увеличением тока дугового разряда и давления газа возрастает градиент продольной неоднородности плазмы дугового разряда в полном аноде, что объясняет увеличение степени неоднородности плазмы в эксперименте. Уменьшение концентрации плазмы и увеличение коэффициента неоднородности при уменьшении коэффициента заполнения импульса несамостоятельного тлеющего разряда связано с динамикой процесса генерации анодной плазмы и

формированием плазменного образования. С увеличением напряжения горения тлеющего разряда (тока тлеющего разряда) увеличивается плотность тока быстрых ионов, поступающих в полый анод, что обуславливает увеличение концентрации анодной плазмы и уменьшение степени ее неоднородности.

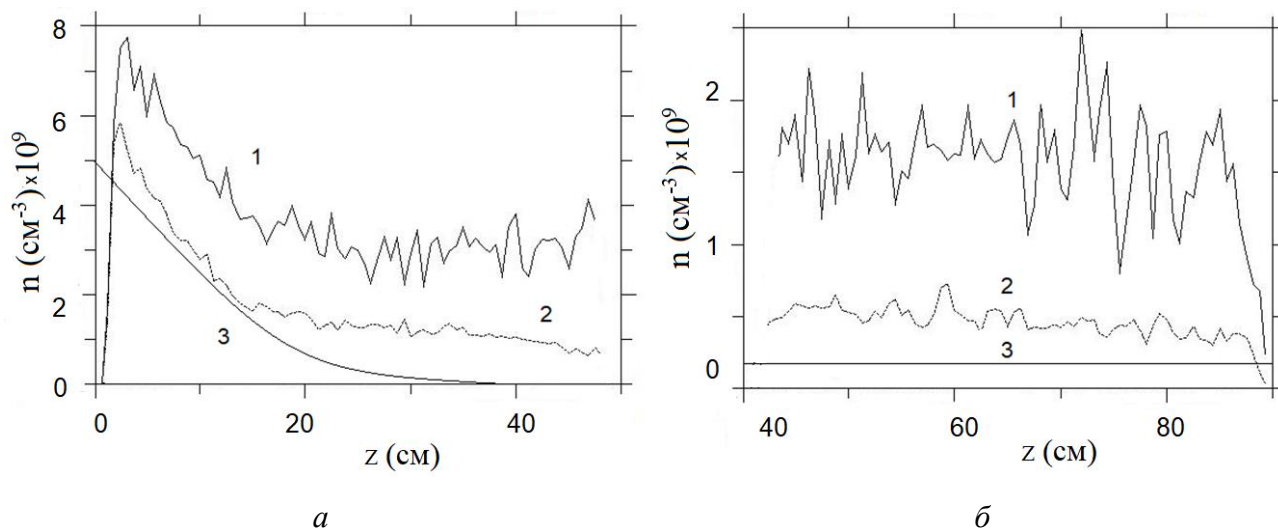


Рисунок 3.11 – Распределение электронов плазменного образования в области I (а) и II (б) на разных радиусах: 1 – $r = 0,6$ см; 2 – $r = 3$ см; 3 – распределение плазмы без тока ионов

Таким образом, увеличение концентрации плазмы и снижение степени неоднородности распределения плотности ионного тока внутри полого сетчатого анода при увеличении диаметра цилиндрического анода с 115 мм до 200 мм обусловлено двумя факторами. Во-первых, при увеличении диаметра анода увеличивается общий ток ионов, поступающих в него. При давлении аргона 0,15 Па средняя длина свободного пробега иона до перезарядки составляет 7 см. Родившиеся в реакциях перезарядки энергетичные атомы аргона на аноде с бóльшим диаметром наиболее вероятно потратят свою энергию на генерацию плазмы. Так как газокинетическое сечение столкновений атомов аргона $\sigma_{\text{Ar}} = 4,02 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ [99], то по формуле (3.1) получаем, что средняя длина взаимодействия между атомами аргона при давлении 0,15 Па $\lambda_{\text{Ar}} = 6,25$ см. Это подтверждает высокую вероятность большего количества взаимодействий атомов аргона при увеличении диаметра полого анода. Во-вторых, с увеличением диаметра анода увеличивается также длина пути электронов, эмитируемых катодным пятном

дугового разряда, до их ухода на анод. Благодаря этому увеличивается и длина дрейфа вдоль оси эмиттера электронов, компенсирующих объёмный заряд ионов, инжектируемых из плазмы тлеющего разряда. В совокупности эти факторы уменьшают степень неоднородности концентрации плазмы в продольном направлении внутри полого сетчатого анода и, как следствие, повышая однородность плотности потока электронов в тлеющий разряд, и степень неоднородности концентрации заряженных частиц основного тлеющего разряда.

Согласие результатов численного моделирования с экспериментом позволяет считать, что основными процессами при формировании пучково-плазменного образования в протяженном цилиндрическом полом аноде являются генерация плазмы дугового разряда и ионно-пучковой плазмы, перезарядка быстрых ионов и ионизация рабочего и остаточного газа плазменными и вторичными электронами.

Взаимосвязь процессов генерации плазмы несамостоятельного тлеющего разряда в полом катоде и плазмы вспомогательного дугового разряда в полом сеточном аноде определяет распределения концентрации заряженных частиц в плазменных образованиях в этих объемах. Степень неоднородности распределения концентрации плазмы внутри полого цилиндрического сетчатого анода зависит от электрических характеристик дугового и тлеющего разряда, геометрии сеточного анода, давления и сорта рабочего газа.

Исследование влияния величины индукции аксиального магнитного поля и диаметра отверстия диафрагмы инжектора электронов на степень неоднородности дуговой плазмы проводилось при токе дугового разряда 50 А в квазистационарном режиме на третьей миллисекунде разрядного импульса при частоте следования импульсов $f = 38$ Гц с коэффициентом заполнения $\gamma = 13\%$ (см. рисунок 2.2) при следующих значениях индукции магнитного поля катушки: 10, 20, 30 мТл и диаметрах выходной апертуры источника дуговой плазмы $d_1 = 44$ мм и $d_2 = 24$ мм. Вакуумная камера откачивалась до предельного давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па, а затем осуществлялся напуск рабочего газа – аргона – до давления около 0,3 Па. После инициирования и зажигания стационарного вспомогательного дугового разряда зажигался импульсный несамостоятельный тлеющий разряд

На рисунке 3.12,*а* и 3.12,*б* представлены распределения плотности ионного тока j_{col} на плоский зонд в плазме тлеющего разряда вдоль оси полого катода для разных диаметров отверстия в диафрагме инжектора электронов. Использование диафрагмы диаметром 44 мм позволяет значительно (примерно в 2 раза) снизить неоднородность концентрации плазмы в полном катоде на высоте 200–800 мм от нижней стенки полого катода по сравнению с отверстием диаметром 24 мм. График продольного распределения концентрации заряженных частиц в полном сетчатом аноде дугового разряда имеет близкий к распределению плотности ионного тока на зонд в ППО тлеющего разряда характер для обоих диаметров отверстий в диафрагме при абсолютном значении концентрации $(0,25-1) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Сравнивая распределения концентрации плазмы в полном сетчатом аноде для двух диаметров отверстия, необходимо отметить, что бóльший диаметр отверстия выходной диафрагмы позволяет повысить концентрацию плазмы в середине ($L = 600$ мм) полого анода и получить максимум концентрации при средней величине индукции магнитного поля катушки 20 мТл, а при меньшем диаметре отверстия наблюдается более сильное контрагирование дугового разряда и максимум располагается ближе к выходной апертуре источника дуговой плазмы для $L = 380$ мм.

Как видно из рисунка 3.12, при бóльшем диаметре диафрагмы (рисунок 3.12,*в*) наблюдается влияние величины магнитного поля на распределения концентрации плазмы. Изменение индукции магнитного поля катушки приводит к изменению концентрации плазмы для некоторых точек распределения на 10–15%. Монотонный спад распределения температуры электронов (рисунок 3.12,*д*, *е*) от выходной апертуры дугового источника к противоположному основанию полого анода и абсолютные значения температуры электронов (1,2–2,5 эВ) свидетельствуют о том, что для данных условий эксперимента в атмосфере аргона по всей длине полого анода распространяется плазма дугового разряда.

Приведенные распределения свидетельствуют о наличии оптимальных значений как индукции магнитного поля, так и диаметра выходной апертуры дугового источника, обеспечивающих наименьшую неоднородность

распределения концентрации плазмы и по длине полого анода дугового разряда, и по длине полого катода основного тлеющего разряда.

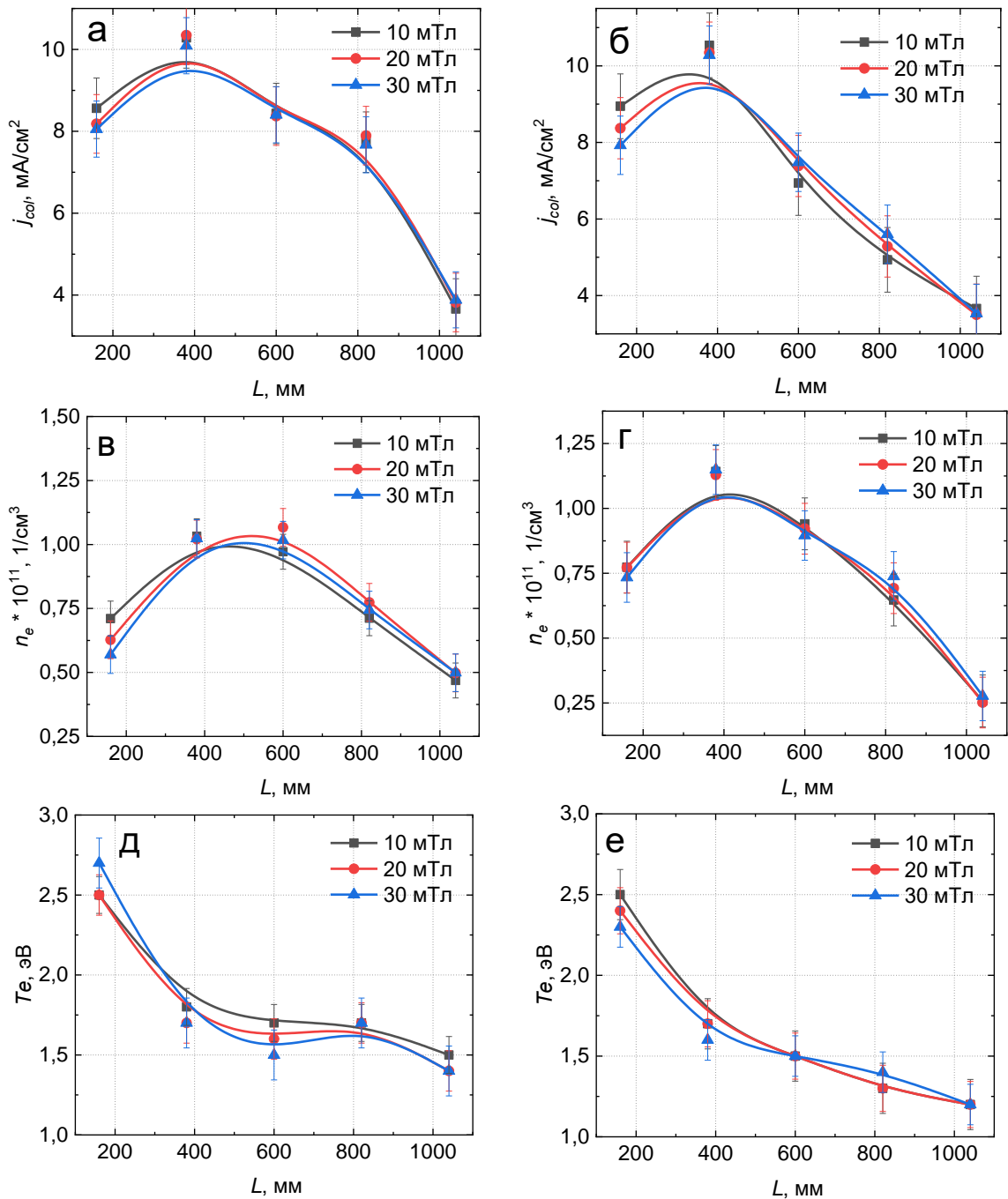


Рисунок 3.12 – Распределения плотности ионного тока на плоский зонд в плазме тлеющего разряда вдоль оси полого катода (а, б), концентрации плазмы (в, г) и температуры электронов (д, е) внутри сетчатого анода дугового разряда в атмосфере аргона для разных значений индукции магнитного поля при токе дугового разряда 50 А. Диаметр отверстия в диафрагме источника дуговой плазмы 44 мм (а, в, д) и 24 мм (б, г, е)

Исследования распределений плотности ионного тока j_{col} в плазме тлеющего разряда и распределений концентрации плазмы и температуры электронов вдоль

оси полого анода в атмосфере азота (рисунок 3.13) показали, что в близких экспериментальных условиях плазма от дугового источника не достигает противоположного торца анода.

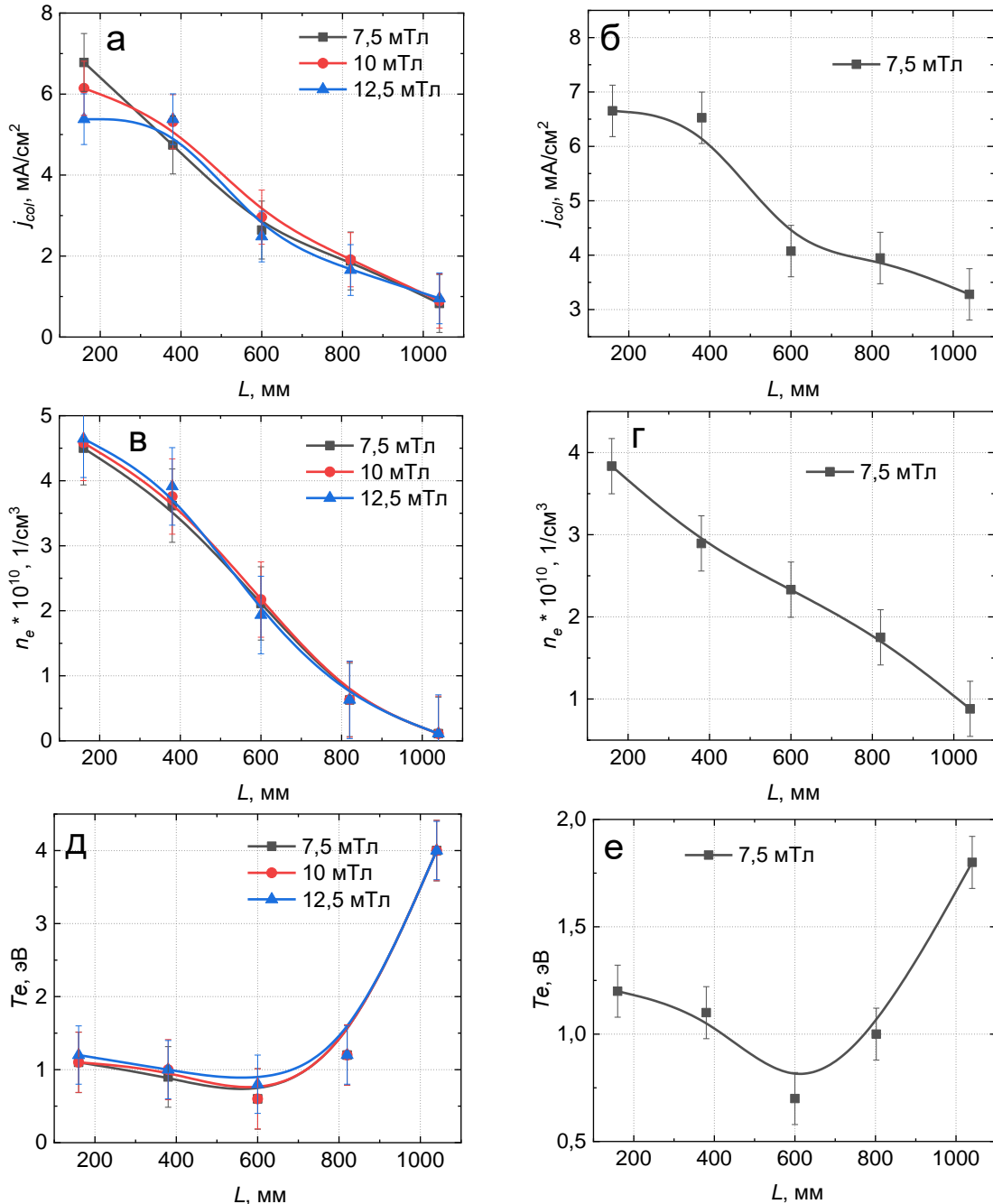


Рисунок 3.13 – Распределения плотности ионного тока на плоский зонд в плазме тлеющего разряда вдоль оси полого катода (а, б), концентрации плазмы (в, г) и температуры электронов (д, е) внутри сетчатого анода дугового разряда в атмосфере азота для разных значений индукции магнитного поля при токе дугового разряда 50 А. Диаметр отверстия в диафрагме источника дуговой плазмы 44 мм (а, в, д) при давлении $p = 1$ Па и 24 мм (б, г, е) при давлении $p = 0,3$ Па

Об этом свидетельствуют графики распределения концентрации заряженных частиц, которая уменьшается до $\sim 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (рисунок 3.13,в), обеспечиваемая потоком ионов из плазмы тлеющего разряда, а также наличие минимума в температуре электронов (рисунок 3.13,д, е) и резкий её рост с величины $\approx 1 \text{ эВ}$ ($L \approx 600 \text{ мм}$) до 4 эВ ($L \approx 1000 \text{ мм}$).

При том же токе дугового разряда и напряжении горения тлеющего разряда ток тлеющего разряда в атмосфере азота составлял около 100 А и был ниже примерно в 3 раза, чем в атмосфере аргона, что и объясняет более низкие значения плотности ионного тока в тлеющем разряде, плотности ионного тока в протяженном полом аноде и концентрации дуговой плазмы. Необходимо отметить, что при работе в атмосфере азота с апертурой $d_1 = 44 \text{ мм}$ рабочее давление устанавливалось равным 1 Па , чтобы обеспечить стабильное горение дугового разряда при повышении величины индукции магнитного поля. Однако при малой ($d_2 = 24 \text{ мм}$) апертуре добиться стабильного горения разряда в атмосфере азота удалось при давлении не выше $p = 0,3 \text{ Па}$.

Приведенные результаты говорят о том, что для исследуемой системы генерации плазмы в протяженном полом сетчатом аноде дугового разряда при одновременном горении тлеющего разряда, обеспечивающего инжекцию внутрь полого анода потока ионов, имеются оптимальные значения индукции внешнего аксиального магнитного поля в источнике дуговой плазмы и диаметра выходной апертуры в нем, обеспечивающие минимальную неоднородность концентрации плазмы в протяженном ($\approx 1 \text{ м}$) полом сетчатом аноде дугового разряда. Общей тенденцией является улучшение однородности распределения концентрации плазмы в полом протяженном сетчатом аноде при слабом контрагировании разряда.

Выводы к главе 3

В результате цикла работ разработан, изготовлен, запущен в эксплуатацию и исследован оригинальный генератор газовых ППО на основе сильноточного

несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с инъекцией электронов из протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера.

Исследования показали, что увеличение диаметра цилиндрического протяженного (длиной 1 м) полого сетчатого анода дугового разряда со 115 мм до 200 мм способствует снижению неоднородности продольного распределения плотности ионного тока. Снижение рабочего давления с 0,6 Па до 0,15 Па также позволяет значительно (на 30–40%) снизить продольную неоднородность концентрации плазмы в полом аноде, что согласуется с более ранними исследованиями. К снижению степени неоднородности приводит также увеличение напряжения горения основного тлеющего разряда с полым катодом благодаря увеличению ионного тока, инжектируемого внутрь полого сетчатого анода.

Полученные результаты позволяют оптимизировать размеры полого протяженного сетчатого анода, а также системы электропитания и управления пучково-плазменной системы.

Подтвердилось, что характер распределения плазмы в основном пучково-плазменном образовании, формируемом в несамостоятельном тлеющем разряде, повторяет характер распределения концентрации плазмы в полом протяженном сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда. Показано, что для обеспечения минимальной неоднородности концентрации плазмы в полом аноде дугового разряда для каждого рода газа требуется подбор оптимальных значений индукции аксиального магнитного поля и диаметра выходной апертуры источника дуговой плазмы.

Результаты исследований, представленных в данной главе, опубликованы в работах [93, 95].

Глава 4. Генератор объёмно-однородных пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и его использование для азотирования сталей

4.1 Параметры и устройство генератора

На основе исследований, представленных в главе 2, был создан генератор объёмных пучково-плазменных образований, позволяющий в непрерывном и импульсном режимах горения разряда в полном катоде объёмом $0,34 \text{ м}^3$ в диапазоне давлений $0,2\text{--}1,0 \text{ Па}$ при токах разряда $2\text{--}300 \text{ А}$ и напряжениях горения от 50 до 250 В при средней мощности в разряде до 25 кВт создавать плазму с концентрацией $\approx 5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ с неоднородностью не хуже $\pm 25\%$ от среднего значения и обеспечивать среднюю плотность ионного тока на полый катод площадью $\approx 2,4 \text{ м}^2$ до 4 мА/см^2 . Генератор низкотемпературной плазмы предназначен для очистки, активации и азотирования поверхности изделий из конструкционных и инструментальных сталей массой до 150 кг . Блок-схема установки на базе данного генератора приведена на рисунке 4.1.

Технические и эксплуатационные параметры изготовленного генератора плазмы приведены в таблице 4.1. Генератор позволяет получать азотированные слои на поверхности инструментальных сталей без нитридного слоя, увеличивая износостойкость штампового инструмента до нескольких раз. Преимуществом генератора (рисунок 4.2) на основе тлеющего разряда низкого ($\sim 1 \text{ Па}$) давления по сравнению с используемыми в промышленности генераторами на базе аномального тлеющего разряда, функционирующего при давлениях рабочего газа $100\text{--}1000 \text{ Па}$, является возможность реализации комбинированных процессов в едином вакуумном пространстве камеры, последовательных этапов азотирования и плазменно-ассистированного напыления функциональных покрытий. Ниже представлены некоторые конкретные примеры использования установки на базе созданного генератора.

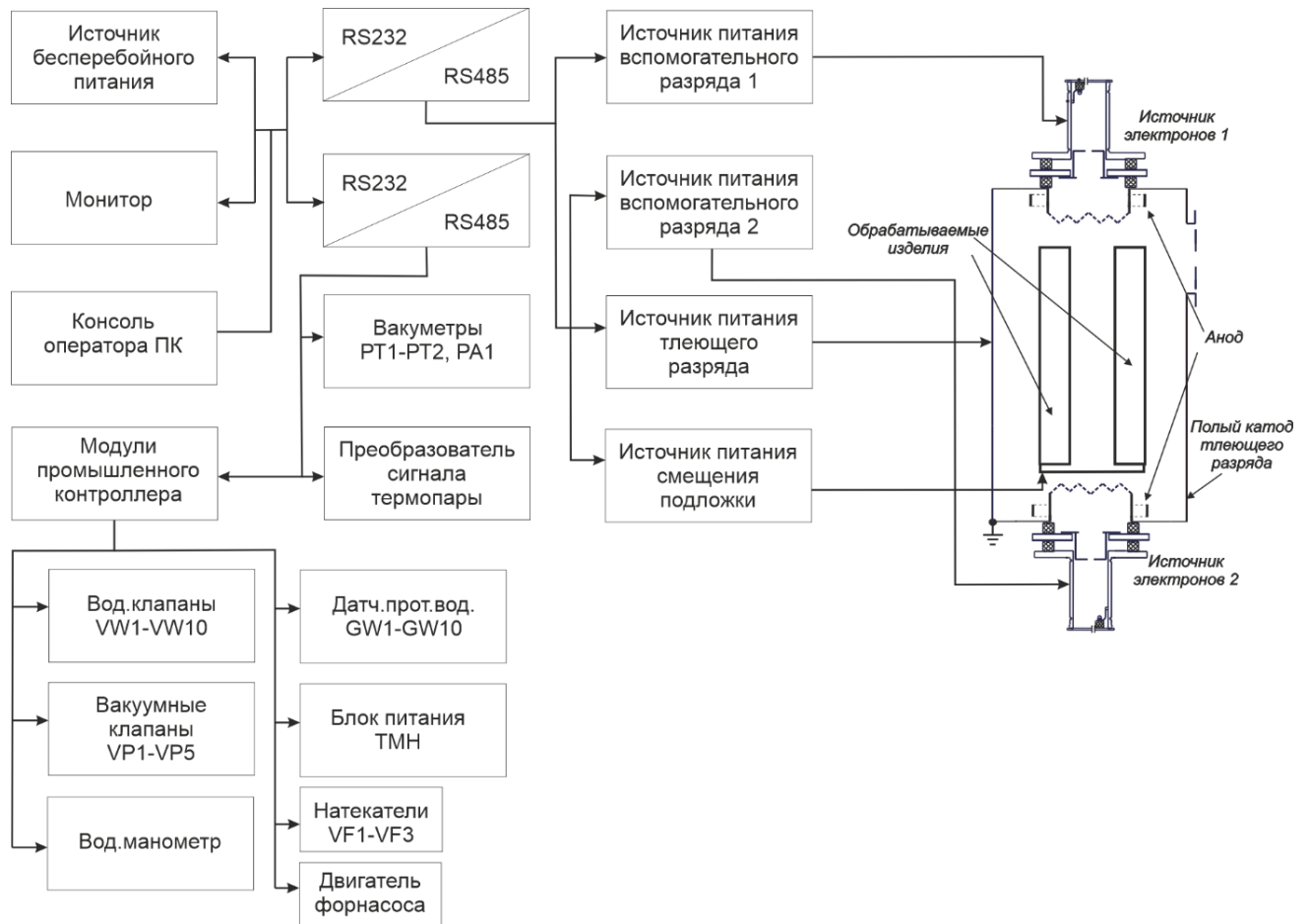


Рисунок 4.1 – Блок-схема установки на базе генератора пучково-плазменных образований на основе протяженного полого катода

Таблица 4.1 – Параметры генератора газовых пучково-плазменных образований для обработки поверхности материалов и изделий

Объем газоразрядной камеры (без теплового экрана)	0,34 м ³
Среднее значение концентрации плазмы при токе разряда 100 А, напряжении горения 200 В, $p = 1$ Па	Не ниже $5 \cdot 10^{11}$ см ⁻³
Неоднородность распределения концентрации плазмы вдоль оси полого катода относительно среднего значения	Не более ± 25 %
Плотность ионного тока при токе разряда 100А, напряжении 200В, $p = 1$ Па	Не ниже 4 мА/см ²
Рабочие газы	N ₂ , Ar, O ₂ , H ₂
Режим горения разряда	Постоянный, импульсный
Частота следования разрядных импульсов	1 Гц ÷ 5 кГц
Коэффициент заполнения разрядных импульсов	1 ÷ 100 %
Напряжение горения разряда	50 ÷ 300 В
Ток разряда в постоянном режиме горения разряда	20 ÷ 100 А
Максимальный ток в импульсном режиме горения	До 300 А
Максимальный средний ток, обеспечиваемый источником питания	100 А
Максимальная средняя мощность в разряде	25 кВт

Максимальная мощность, потребляемая источником питания разряда из сети	30 кВт
Размеры полезной области для загрузки деталей (с тепловым экраном)	(350×350×800) мм
Масса обрабатываемых деталей в одной загрузке	До 150 кг
Максимальная достигаемая температура деталей (с тепловыми экранами)	750 °С



Рисунок 4.2 – Внешний вид генератора пучково-плазменных образований со стойкой управления

4.2 Закономерности азотирования штамповой стали 4X5МФС

Созданный генератор объемно-однородных ППО использовался для проверки возможности низкотемпературного азотирования широко распространенной в промышленности штамповой стали 4X5МФС.

Основной задачей было определение влияния содержания азота в азот-аргоновой смеси на свойства азотированного слоя. Ранее было показано, что при низком (~ 1 Па) давлении насыщающая среда способна с избытком поставлять к поверхности обрабатываемого изделия азот, диффундирующий вглубь азотируемого изделия [100–109]. Наиболее медленной стадией этого процесса, протекающего на границе «плазма – твердое тело» в результате процесса

хемосорбции, является стадия диффузии азота вглубь материала. По причине ограниченной скорости диффузии азот накапливается в приповерхностном слое металла и происходит образование хрупких нитридных фаз (Fe_{2-3}N , Fe_4N). В ряде случаев предпочтительным, особенно при ударных рабочих нагрузках, является обеспечение тонкого нитридного слоя либо только твердого раствора азота в приповерхностном слое. Регулировка потока азота на поверхность стали в процессе азотирования в плазме тлеющего разряда достигается снижением парциального давления азота. При этом поддержание стабильного горения разряда и эффективности ионной очистки поверхности достигается добавлением аргона в азотосодержащую смесь.

Определение влияния содержания азота в азот-аргоновой газовой смеси на свойства азотированного слоя проводилось при одном и том же давлении 1 Па для следующих значений содержания азота: 100, 50, 25, 10%. Азотирование проводилось при следующих параметрах: ток вспомогательного разряда – 19 А; напряжение горения тлеющего разряда – 165 В; ток тлеющего разряда – 18–30 А; отрицательное напряжение смещения на образцы – 200 В и 600 В; температура азотирования – 520 °С; время азотирования – 3 ч, скорость азотирования около 80 мкм/ч.

При исследовании микроструктуры поверхности образцов с помощью оптического микроскопа (рисунок 4.3) было выявлено, что после азотирования в смеси с содержанием азота в газовой смеси 100, 50 и 25% структура поверхности состоит из тонкого (до 10 мкм) нитридного слоя и диффузионного слоя толщиной 80–90 мкм. В газовой смеси с содержанием азота 10% (парциальное давление азота около 0,15 Па) наблюдается только диффузионный слой, а нитридный слой отсутствует.

Исследования микроструктуры поперечных шлифов образцов стали 4Х5МФС после азотирования в плазме тлеющего разряда с полым катодом при общем давлении 1 Па показывают, что при снижении парциального давления азота в рабочей газовой смеси уменьшается как толщина нитридного слоя, содержащего фазы $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ и $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, вплоть до его исчезновения, так и общая толщина

азотированного слоя (рисунок 4.4). Это справедливо для напряжения отрицательного смещения 200 В. Для напряжения отрицательного смещения 600 В также наблюдается снижение толщины нитридного слоя, однако максимальная толщина азотированного слоя, включающего нитридную и диффузионную зоны, наблюдается при содержании азота в газовой смеси 25%. Минимальное значение толщины азотированного слоя для этого значения напряжения смещения наблюдается при содержании азота в рабочей смеси 10%.

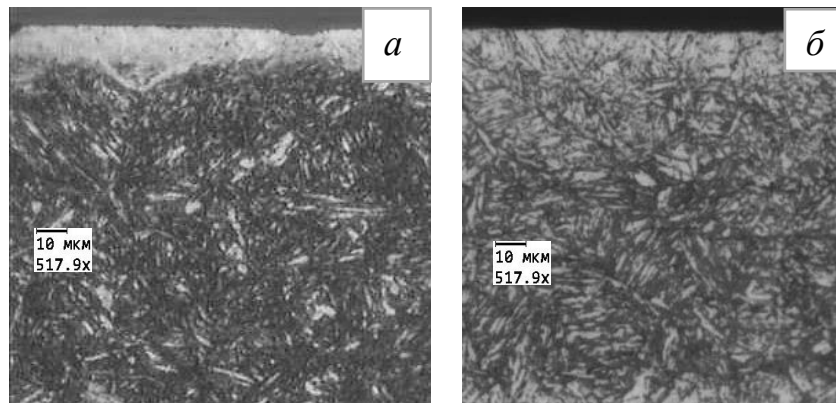


Рисунок 4.3 – Фото микроструктуры стали 4X5MFC после азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси: *a* – N₂ (100%); *б* – N₂(10%)+Ar(90%); величина отрицательного напряжения смещения – 200 В [94]

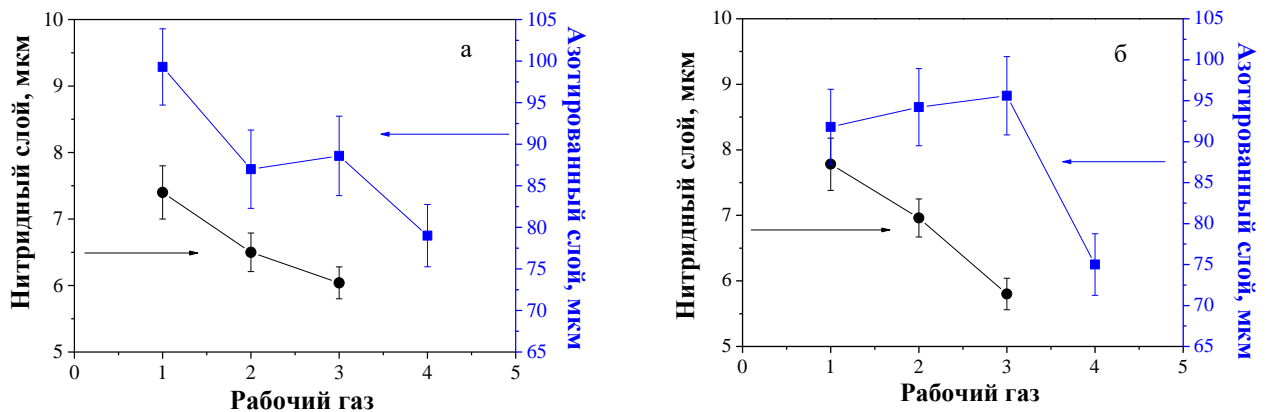


Рисунок 4.4 – Толщина нитридного и азотированного слоя, сформировавшегося в результате азотирования стали 4X5MFC в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси: 1 – N₂ (100%); 2 – N₂(50%)+Ar(50%); 3 – N₂(25%)+Ar(75%); 4 – N₂(10%)+Ar(90%); *a* – отрицательное напряжение смещения 200 В; *б* – отрицательное напряжение смещения 600 В [94]

Более подробное исследование распределения микротвердости по глубине азотированного слоя (рисунок 4.5) показало, что при напряжении смещения 600 В и содержании азота в рабочей смеси 10 % не формируется плато, характерное для напряжения смещения 200 В. Это, по-видимому, связано с тем, что при таком содержании азота в смеси его поступление на поверхность сильно снижается, а рост энергии бомбардирующих ионов аргона за счёт повышения напряжения смещения приводит к стравливанию части осаждающегося на поверхности азота и, соответственно, к его недостатку на поверхности. Это и приводит к значительной разнице формы распределений, полученных при разных величинах напряжения смещения. Для содержания азота 100, 50 и 25 % характерна «полочка» со значением твердости от 10 до 11 ГПа.

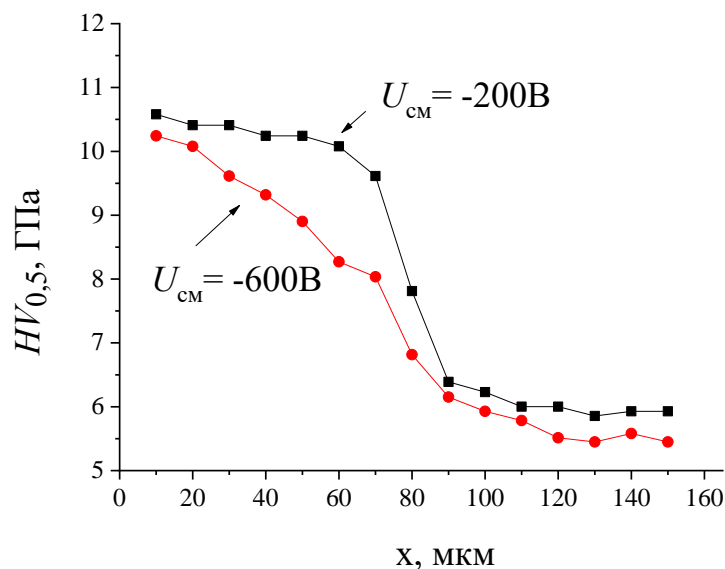


Рисунок 4.5 – Распределение микротвердости по глубине азотированного слоя стали 4X5MФС после азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси N₂(10%)+Ar(90%)

На рисунке 4.6 приведены рентгенограммы образцов стали 4X5MФС после азотирования при разном содержании азота в рабочей смеси. Полученные данные подтверждают отсутствие на поверхности нитридных фаз ϵ -Fe₂₋₃N и γ -Fe₄N при составе газовой смеси N₂(10%)+Ar(90%).

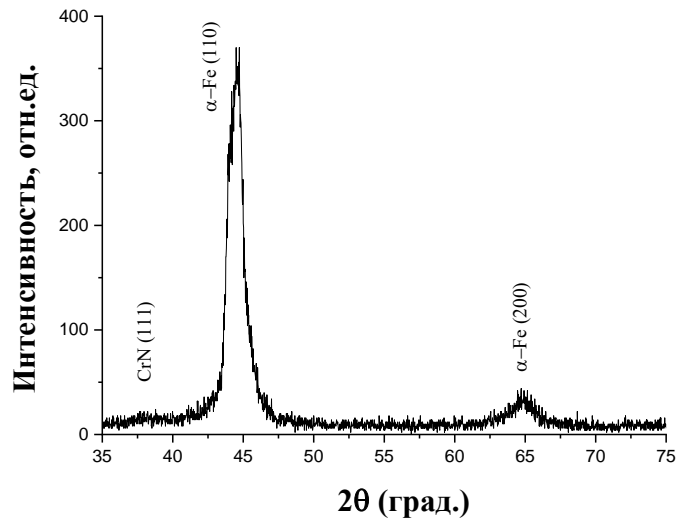


Рисунок 4.6 – Участки рентгенограмм образцов стали 4X5МФС после азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси $N_2(10\%)+Ar(90\%)$

Генерация плазмы в атмосфере чистого азота позволяет создавать насыщающую среду, способную при температуре азотирования стали 520 °С в избытке поставлять к поверхности азот. Об этом свидетельствуют данные, приведенные в таблице 4.2. Снижение парциального давления азота в рабочей газовой смеси при том же суммарном давлении за счет добавления аргона приводит сначала к снижению доли фазы $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ и увеличению доли фазы $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, а затем и к формированию только твердого раствора азота в железе и фазы CrN.

Таблица 4.2 – Фазовый состав стали 4X5МФС после азотирования при разных соотношениях аргона и азота в газовой смеси.

Рабочий газ	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, масс%
N ₂ (100%)	$\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$	97
	$\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$	3
N ₂ (50%)+Ar(50%)	$\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$	93
	$\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$	7
N ₂ (25%)+Ar(75%)	$\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$	69
	$\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$	31
N ₂ (10%)+Ar(90%)	$\alpha\text{-Fe}$	98
	CrN	2

Для определения коэффициента трения были проведены испытания поверхности азотированных образцов на приборе Tribotechnik (Франция). Испытания проводились по схеме «палец – диск» при возвратно-поступательном движении образца относительно контртела (рубиновый шарик диаметром 6 мм) при нагрузке 12 Н. Скорость движения составляла 25 мм/с, длина трека – 400 м. Измеренные коэффициенты трения представлены на рисунке 4.7, из которых наиболее низкий характерен для поверхности без нитридного слоя на азотированной стали.

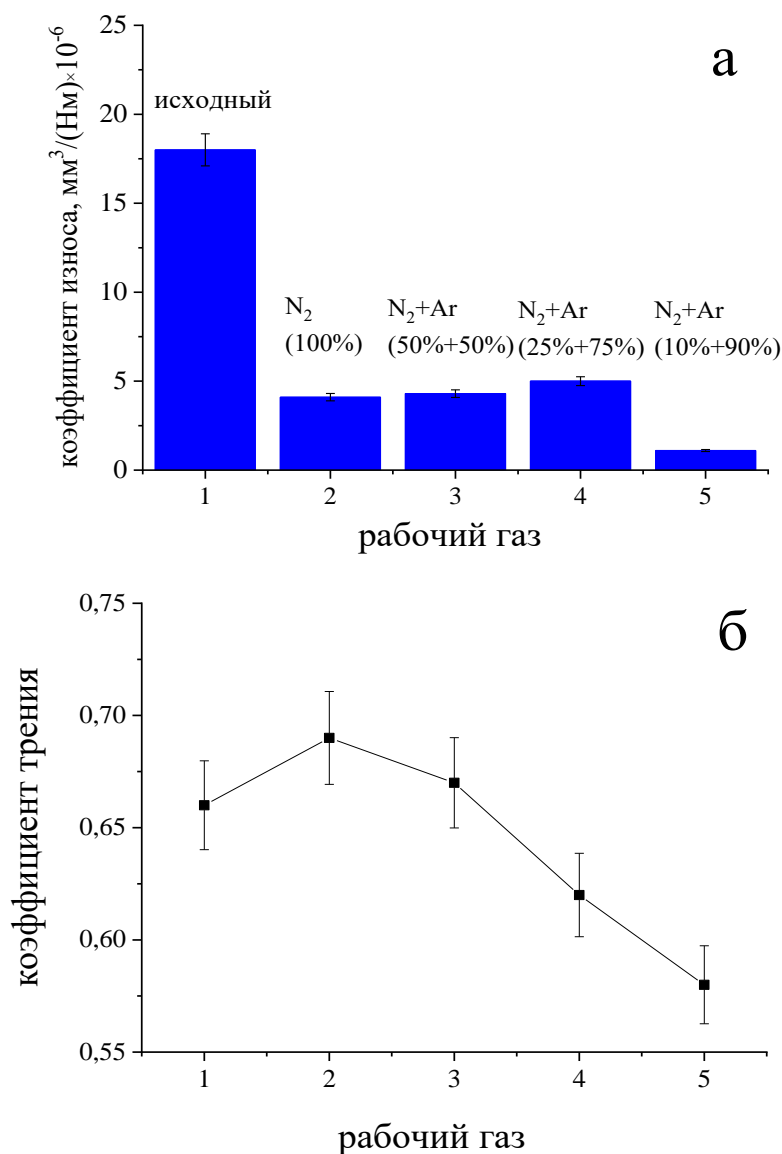


Рисунок 4.7 – Коэффициент износа (а) и коэффициент трения (б) стали 4X5MFC до и после азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси:
 1 – исходный; 2 – N_2 (100%); 3 – $\text{N}_2(50\%)+\text{Ar}(50\%)$; 4 – $\text{N}_2(25\%)+\text{Ar}(75\%)$;
 5 – $\text{N}_2(10\%)+\text{Ar}(90\%)$; напряжение смещения – 600 В

Минимальный износ, который в 5–6 раз ниже, чем после азотирования в других смесях газов, также характерен для случая твердого раствора азота в стали при азотировании в газовой смеси $N_2(10\%)+Ar(90\%)$. Вероятно, это связано, во-первых, с наиболее низким коэффициентом трения по сравнению с другими случаями, а во-вторых, с отсутствием частиц износа в виде твердых абразивных частиц твердых фаз $\epsilon-Fe_{2-3}N$ и $\gamma-Fe_4N$, наиболее интенсивно истирающих материал.

Таким образом, в результате комплексных исследований закономерностей эволюции фазового состава, структуры азотированного слоя стали, сформированного после обработки в азотосодержащей плазме с различным содержанием азота в рабочей смеси, а также анализа физико-механических свойств поверхности модифицированного материала были подобраны эффективные режимы ионно-плазменного азотирования стали марки 4X5МФС, широко используемой в промышленности, а именно: давление азота 1 Па; ток вспомогательного разряда 19 А; напряжение горения тлеющего разряда 165 В; ток тлеющего разряда 30 А; отрицательное напряжение смещения на образцы 600 В; температура азотирования 520 °С; время азотирования 3 ч.

4.3 Азотирование изделий из штамповых сталей

Как было показано в подразделе 4.2, при низком (~ 1 Па) давлении рабочего газа содержание азота в азот-аргоновой смеси играет определяющую роль в формировании фазового состава и физико-механических свойств поверхностного слоя азотируемых пуансонов из стали 4X5МФС. Наименьший износ поверхности штамповых сталей наблюдается после азотирования при низком ($\sim 10\%$) содержании азота в азот-аргоновой газовой смеси, при котором на поверхности не формируется хрупкий нитридный слой. На основе полученных результатов были разработаны технологические режимы ионно-плазменного азотирования ряда промышленно выпускаемых пуансонов из штамповых сталей. При этом срок службы пуансонов для холодного прессования деталей возрос в несколько раз по сравнению с пуансонами, обработанными по традиционной технологии закалки.

Определены основные технические возможности и сферы применения метода азотирования: стали для горячего деформирования (4X5МФС и их аналоги); стали для холодного деформирования (X12МФ и их аналоги); конструкционные стали (40X, 38X2МЮА и др.); масса обрабатываемых изделий из инструментальных сталей – от 0,1 до 150 кг; размеры обрабатываемых изделий – высота до 800 мм, диаметр до 350 мм.

Технологические режимы азотирования с использованием предлагаемого способа управления фазовым составом внедрены и апробированы на промышленно выпускаемых изделиях (рисунок 4.8) совместно с различными промышленными предприятиями и могут быть рекомендованы к применению на предприятиях практически всех отраслей современной промышленности, что подтверждается актами внедрения (приложение Б).



Рисунок 4.8 – Азотированные пуансоны из штамповых сталей в рабочей камере установки для генерации пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом

4.4 Азотирование трубчатых изделий из нержавеющей стали

Азотирование тонкостенных трубчатых изделий – относительно новая задача в современной промышленности и не имеет широкого применения в настоящее время. Однако с ростом современных возможностей промышленного производства высокоточных тонкостенных изделий из металлов и сплавов открывается новая ниша в области ионно-плазменной обработки поверхности металлов и сплавов. В рамках диссертационной работы были проведены исследования по азотированию трубки (длиной ~500 мм) из нержавеющей стали SUS404. Внешний диаметр трубки составлял 450 мкм, внутренний – 250 мкм, толщина стенки – 100 мкм. Тонкостенные трубки применяются для изготовления игл медицинских катетеров (рисунок 4.9). Задача состояла в увеличении жёсткости трубки и обеспечении однородной обработки по ее длине.

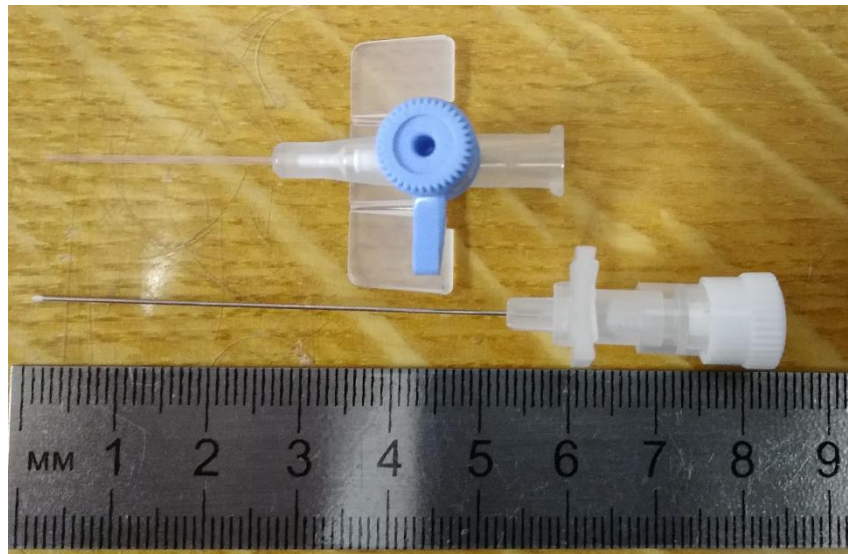


Рисунок 4.9 – Медицинский катетер

4.4.1 Методы и техника эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.10. Установка откачивалась турбомолекулярным насосом до давления 10^{-2} Па. Затем производился напуск рабочего газа (азота) до давления 0,6 Па. Трубки в количестве 60 штук крепились в ближнем углу так, как показано на фотографии, для измерения

распределения температуры по длине трубок. Поверхность трубок нагревалась при бомбардировке ионами азота, ускоренными отрицательным напряжением смещения, составляющим во всех экспериментах около 285 В.

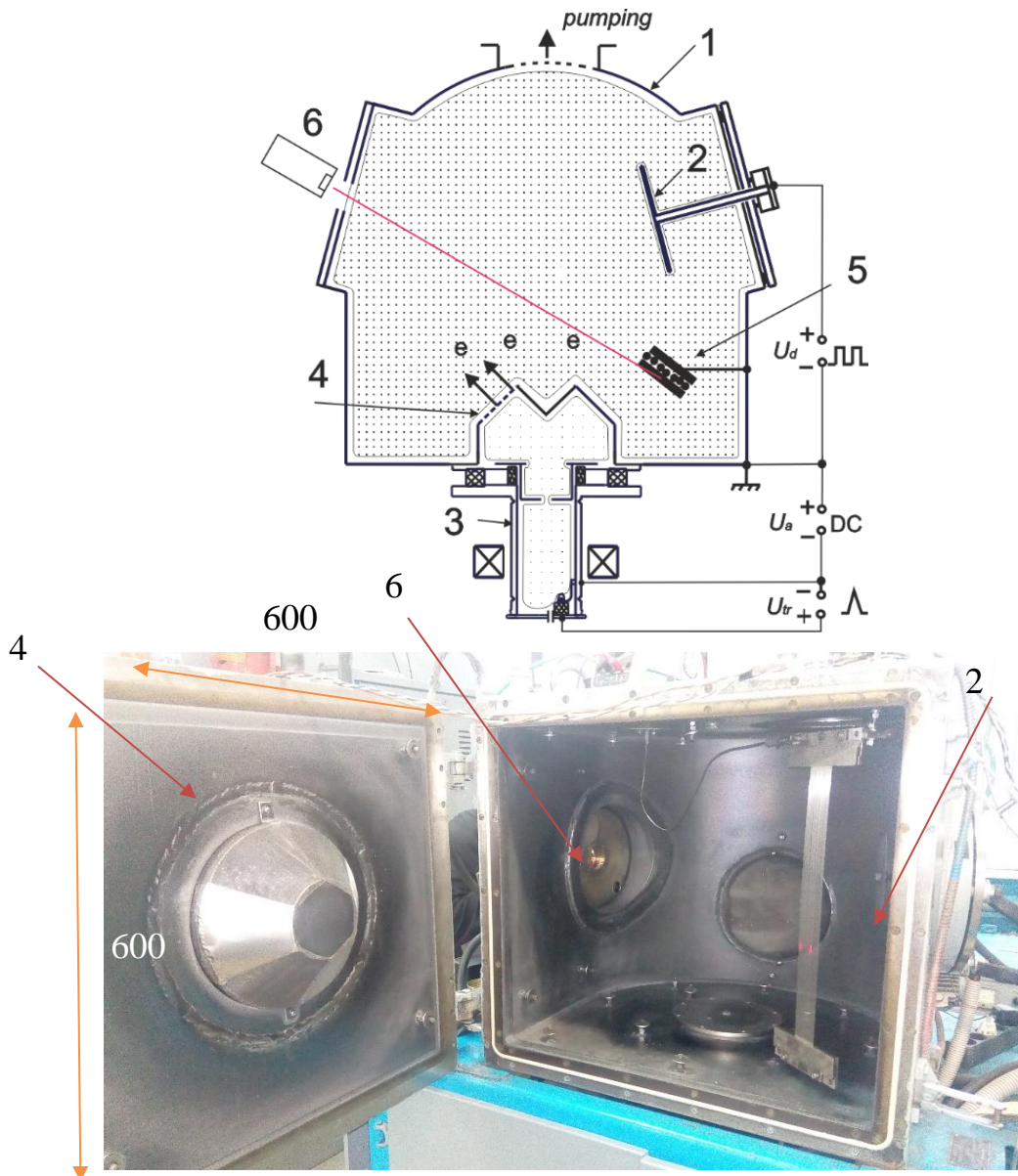


Рисунок 4.10 – Схема экспериментальной установки: 1 – катод несамостоятельного тлеющего разряда; 2 – плоский анод тлеющего разряда; 3 – инжектор электронов на основе дугового разряда с холодным полым катодом; 4 – сетчатый эмиссионный электрод; 5 – держатель трубок; 6 – пирометр

4.4.2 Результаты азотирования тонкостенных труб

В ходе проведения работ был выбран оптимальный режим азотирования: давление азота 0,6 Па; ток вспомогательного дугового разряда 30 А; напряжение

основного несамостоятельного тлеющего разряда 280 В; ток основного несамостоятельного тлеющего разряда 9 А; частота следования импульсов 240 Гц; коэффициент заполнения импульсов 14%; время азотирования 30 мин. Получены результаты распределения микротвёрдости по длине трубок, а также результаты исследования трубок на прогиб. На рисунке 4.11 показано распределение микротвёрдости по длине трубки.

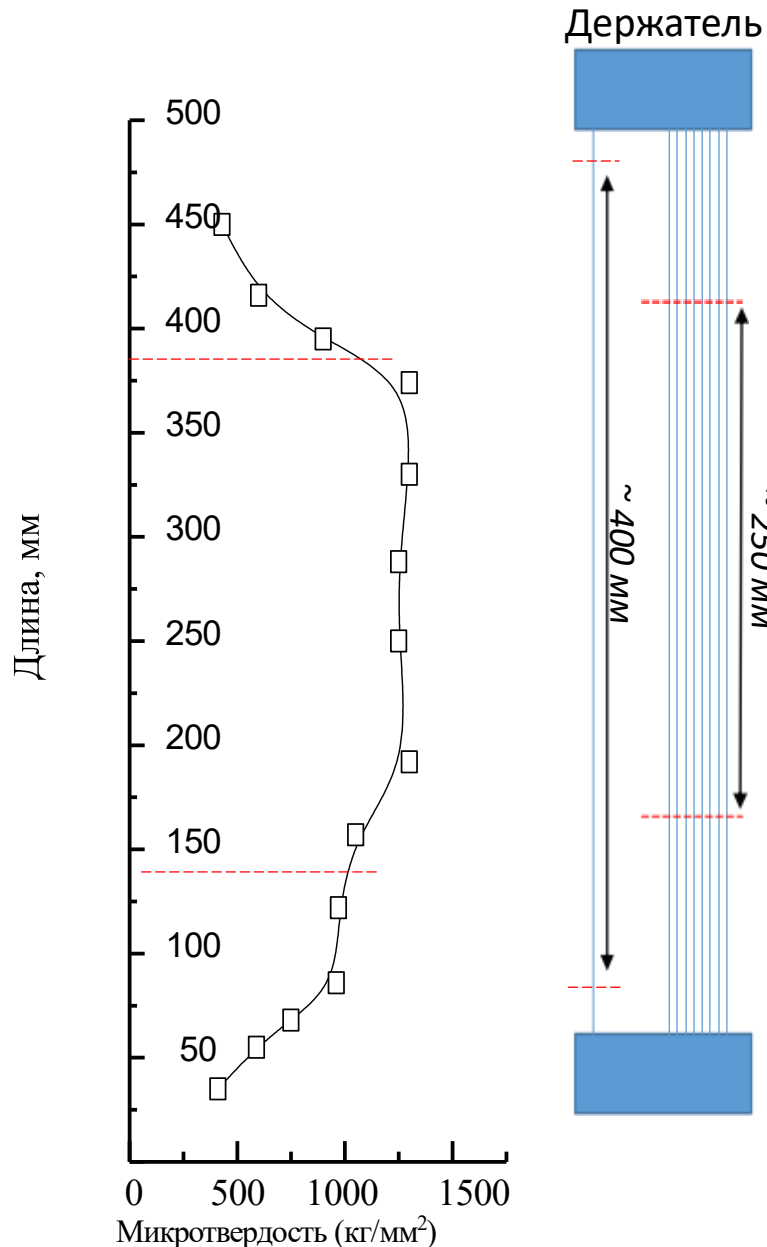


Рисунок 4.11 – Распределение микротвердости по длине трубки

Толщина азотированного слоя составила 6,5 мкм (рисунок 4.12), неоднородность твердости азотированного слоя на выбранной длине 300 мм – 12%.

Снижение микротвердости по длине трубки связано с отводом тепла от трубок держателем.

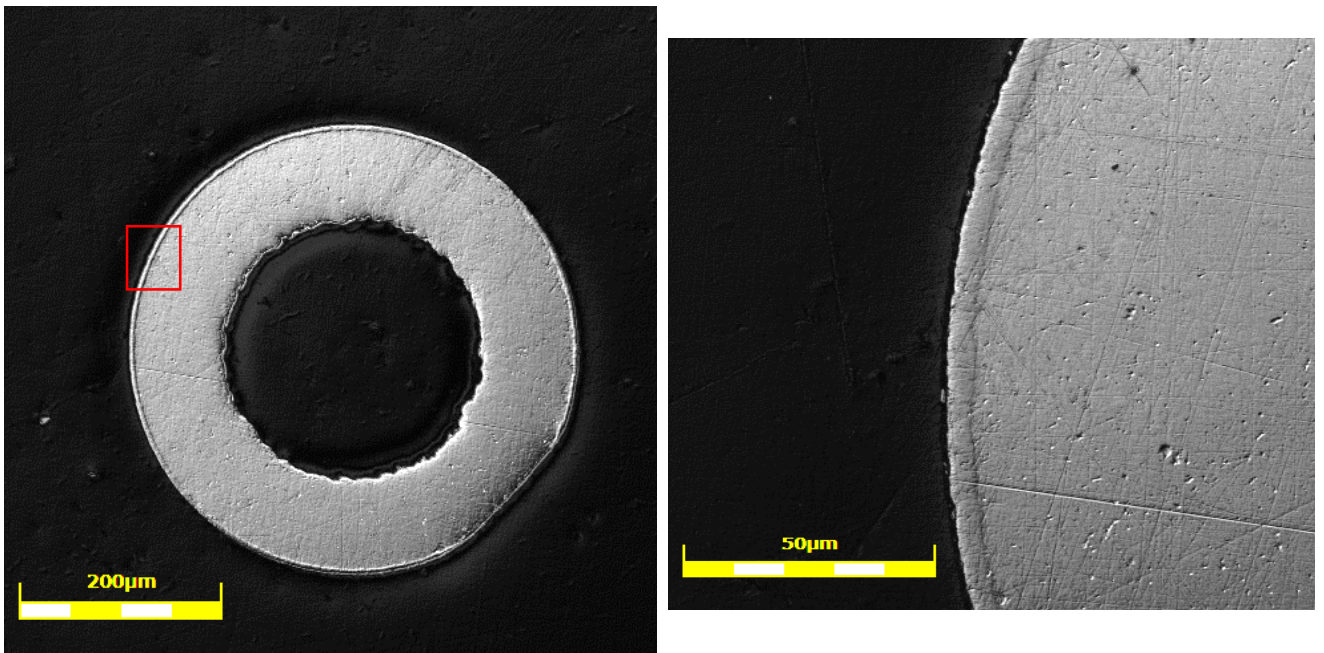


Рисунок 4.12 – Поперечный шлиф трубки

После азотирования были проведены испытания на изгиб шести отрезков длиной по 70 мм одной и той же трубки с использованием трибометра Tribotechnic (рисунок 4.13).

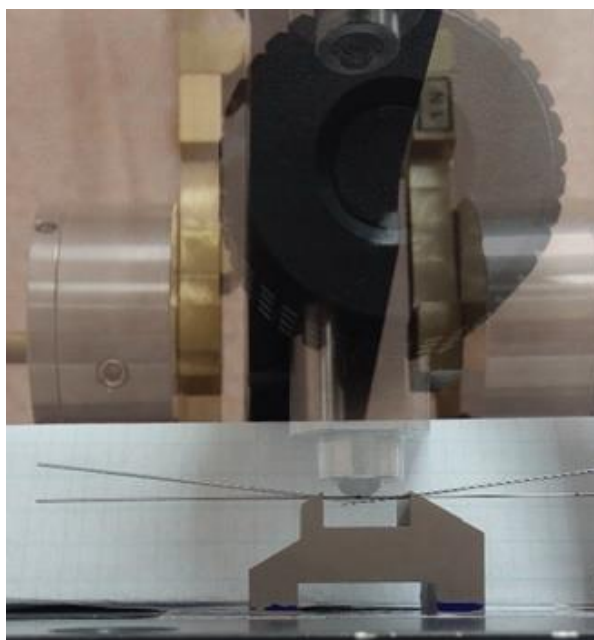


Рисунок 4.13 – Схема испытания трубок на изгиб

Испытания на изгиб проводились при нагрузке 600 г (6 Н), контактным телом был шарик диаметром 6 мм. Величина прогиба трубки измерялась посредством сравнения двух снимков со стационарной фотокамеры. Величина прогиба образца без обработки составила чуть более 500 мкм. На рисунке 4.14 представлено распределение величины прогиба по всей длине трубки.

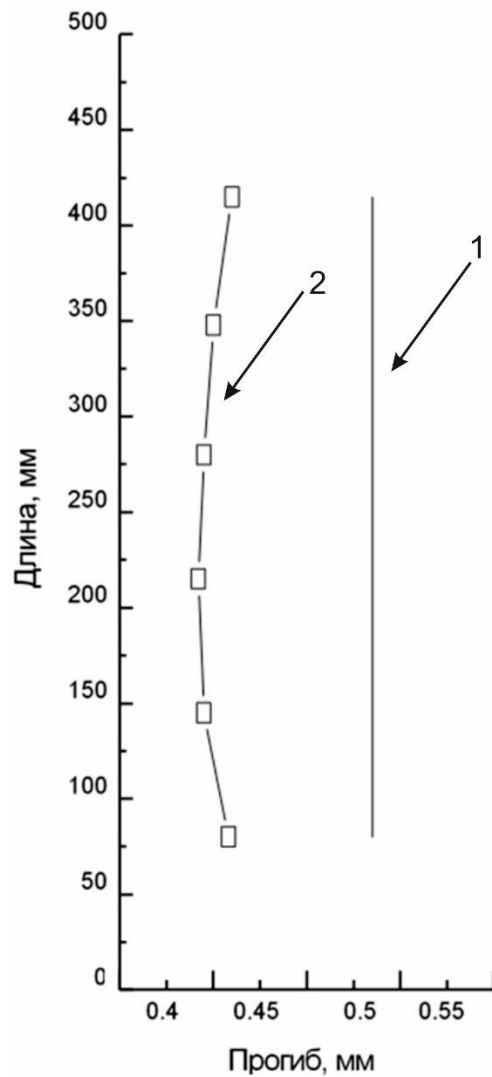


Рисунок 4.14 – Распределение величины прогиба по всей длине трубки:
1 – образец без азотирования; 2 – образец после азотирования

Результаты измерений показывают, что уменьшение величины отклонения при прогибе трубки на 20% по сравнению со значением отклонения необработанной трубки приблизительно одинаковое для всех отрезков азотированной трубки. Неоднородность величины прогиба по выбранным

образцам на длине около 300 мм составила 5%, что свидетельствует о низкой степени неоднородности глубины азотированного слоя по длине трубок.

Подбором параметров импульсного несамостоятельного тлеющего разряда (частота следования импульсов, коэффициент заполнения импульса, ток инжекции электронов и ток основного разряда) можно оптимизировать процесс азотирования трубок.

Было замечено, что азотирование трубок происходит даже в местах их закрепления в держателе. Это может свидетельствовать о том, что тлеющий разряд с полым катодом, являющийся эффективным генератором атомарного азота, способствует проведению азотирования закрытых от прямого контакта с плазмой участков трубок, что открывает перспективы нового метода азотирования, когда неважно будет, как и где расположены трубки. Важно будет обеспечить равномерный нагрев и равномерное поступление азота.

Выводы к главе 4

Изготовлены и введены в эксплуатацию генератор ППО и установка на базе данного плазмогенератора с возможностью обработки изделий высотой до 800 мм, диаметром до 350 мм и весом до 150 кг. Конструкция и электропитание плазмогенератора позволяют независимо регулировать напряжение горения и ток основного несамостоятельного тлеющего разряда, а также энергию ионов, поступающих на поверхность обрабатываемой детали.

Наилучшие свойства азотированного слоя обеспечивает режим азотирования в смеси $N_2(10\%)+Ar(90\%)$, в котором не формируются хрупкие нитридные фазы. Разработаны технологические режимы обработки для ряда сталей – это стали для горячего деформирования (4X5МФС и её аналоги); стали для холодного деформирования (X12МФ и её аналоги); конструкционные стали (40X, 38X2МЮА и др.). Определены также основные технические возможности и сферы применения ионно-плазменного азотирования в азот-аргоновых газовых ППО, формируемых в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления.

Подобран режим азотирования тонкостенных трубочек для игл катетеров. Величина прогиба трубочек снизилась на 20% по сравнению с исходным образцом. Неоднородность величины прогиба по выбранным образцам на длине 300 мм составила 5%, что свидетельствует о высокой равномерности глубины азотированного слоя по всей длине трубочки. Неоднородность твердости азотированного слоя на выбранной длине 300 мм составила 12%.

Результаты исследований, представленных в настоящей главе, приведены в работах автора [94, 100–103, 107, 108].

Заключение

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. При повышении токов вспомогательного дугового разряда с 20 до 45 А точность выполнения принципа суперпозиции снижается. Так, при включении двух инжекторов электронов с токами 20 А максимальная неоднородность в продольном направлении составила 25%, максимальное отклонение коэффициентов неоднородности при сравнении режимов 3 и 4 составило 8%. Максимальное отклонение значений концентраций плазмы для эксперимента и распределения, полученного в результате сложения распределений, полученных при отдельной работе инжекторов электронов, составляет 20% и наблюдается на продольной оси полого катода.

2. При включении двух инжекторов электронов с токами 45 А максимальная неоднородность концентрации плазмы в продольном направлении составила 8%, максимальное отклонение коэффициентов неоднородности при сравнении режимов 7 и 8 составило 22%. Максимальное отклонение значений концентраций плазмы для эксперимента и распределения, полученного в результате сложения распределений, полученных при отдельной работе инжекторов электронов, составляет 26% и наблюдается в области геометрической тени для инжектируемых электронов.

3. При включении двух инжекторов электронов с токами 45 А неоднородность распределения потенциала плазмы возрастает, что приводит к направленному движению низкоэнергетических электронов в область увеличенного потенциала. Длина свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями уменьшается, что вызывает более частое изменение траектории движения заряженных частиц и, как следствие, снижение степени неоднородности распределения концентрации плазмы в полом катоде. В случае арифметического сложения распределений, полученных при отдельной работе инжекторов электронов, данная особенность не учитывается. Это приводит

к возрастанию рассогласования экспериментального и суммарного распределений при увеличении тока инжекции электронов.

4. Показано, что система генерации протяженных пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде, в котором в качестве инжектора электронов в тлеющий разряд используется один инициатор (узел поджига) вспомогательного дугового разряда с протяженным (около 1 м) полым сетчатым анодом (плазменным эмиттером электронов), позволяет получить относительно однородную плазму. Наименьшая достигнутая продольная степень неоднородности плотности ионного тока на длине 1 м в полном аноде в атмосфере аргона составляет 30%.

5. Показано, что увеличение диаметра цилиндрического полого сетчатого анода дугового разряда способствует снижению неоднородности продольного распределения плотности ионного тока в нём. Снижение давления, увеличение напряжения горения, а также увеличение коэффициента заполнения импульса основного тлеющего разряда с полым катодом также приводит к уменьшению продольной неоднородности концентрации плазмы в полном аноде. Рост тока дугового разряда увеличивает степень неоднородности плотности ионного тока в полном сетчатом аноде.

6. Подтверждено, что характер распределения концентрации плазмы в основном сильноточном несамостоятельном тлеющем разряде повторяет характер распределения концентрации плазмы в полном протяженном сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда. Показано, что для обеспечения минимальной неоднородности концентрации плазмы в полном аноде дугового разряда для каждого рода газа требуется подбор оптимальных значений индукции аксиального магнитного поля и диаметра выходной апертуры источника дуговой плазмы.

7. Подобран режим азотирования тонкостенных трубочек для игл медицинских катетеров. Величина прогиба трубочек снизилась на 20% по сравнению с исходным образцом. Неоднородность величины прогиба по выбранным образцам на длине 300 мм составила 5%, что свидетельствует о

равномерности ширины азотированного слоя по всей длине трубочки. Неоднородность твердости азотированного слоя на длине 300 мм составила 12%.

8. Изготовлена и введена в эксплуатацию установка с возможностью обрабатывать изделия высотой до 800 мм, диаметром до 350 мм и весом до 150 кг. Конструкция и электропитание установки позволяют независимо регулировать напряжение горения и ток основного несамостоятельного тлеющего разряда, а также энергию ионов, поступающих на поверхность обрабатываемой детали.

9. Наилучшие свойства поверхности азотированного слоя обеспечивает режим азотирования в смеси $N_2(10\%)+Ar(90\%)$, в которой не формируются фазы $\epsilon-Fe_{2-3}N$ и $\gamma-Fe_4N$.

10. Проведена обработка промышленных изделий из стали для горячего деформирования (4X5МФС и их аналоги); стали для холодного деформирования (X12МФ и их аналоги); конструкционных сталей (40X, 38X2МЮА и др.). Процесс азотирования промышленно выпускаемых пуансонов внедрен в производственный цикл ряда промышленных предприятий, что подтверждается актами внедрения результатов диссертационной работы.

По результатам исследований по теме диссертации опубликованы 10 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ: Physics of Plasmas [83]; High Temperature Materials Processes [82]; Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics [88]; Russian Physics Journal [79, 84–87, 89–90, 93, 110], получен патент РФ № 2686975 от 06.05.2019 «Способ ионно-плазменного азотирования изделий из титана и титаносодержащих сплавов» (приложение В).

Представленные в диссертационном исследовании научные результаты позволяют с высокой точностью прогнозировать распределение концентрации заряженных частиц в объеме полого катода генераторов пучково-плазменных образований, создаваемых в больших вакуумных объемах сильноточным несамостоятельным тлеющим разрядом низкого давления, при использовании двух и более инжекторов электронов. Опыт практического внедрения результатов исследования показывает, что разработанный генератор объемно-однородных пучково-плазменных образований имеет перспективу и может быть рекомендован

для внедрения в машиностроительные производства для процессов азотирования широкого круга марок сталей за счет большей функциональности, чем оборудование на основе аномального тлеющего разряда.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, кандидату техн. наук Денисову В.В. и доктору техн. наук Ковалю Н.Н. за руководство, поддержку работы и помощь в подготовке диссертации. Автор признателен кандидату техн. наук Денисовой Ю.А. за проведение анализа азотированных образцов, обсуждение полученных результатов и полезные советы при внедрении результатов диссертационной работы в практику. За предоставление результатов численного моделирования процессов, происходящих в ППО, выражаю особую благодарность доктору физ.-мат. наук Коваль Т.В. Автор признателен также Ковальскому С.С. за помощь в проведении зондовых измерений.

Автор признателен также сотрудникам лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности ИСЭ СО РАН за плодотворную совместную работу и товарищескую помощь.

Список литературы

1. Будилов, В. В. Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов / В. В. Будилов. – М.: Машиностроение, 2013. – 313 с.
2. Аньшаков, А. С. Generation of arc plasma for materials processing / А. С. Аньшаков, О. Г. Волокитин, Э. К. Урбах // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 12-2. – С. 5–7.
3. Фиргер, И. В. Термическая обработка сплавов : справочник / И. В. Фиргер. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 304 с.
4. Чаттерджи-Фишер, Р. Азотирование и карбонитрирование / Р. Чаттерджи-Фишер, Ф. Эйзелл. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
5. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. И. Шпис, З. М. Бёмер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.
6. Пастух, И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
7. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для широкоапертурных ионных источников / А. В. Визирь, Е. М. Окс, П. М. Щанин, Г. Ю. Юшков // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67, № 6. – С. 27–31.
8. Генератор плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема / И. В. Лопатин, Ю. Х. Ахмадеев, Н. Н. Коваль, П. М. Щанин // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 151–155.
9. Генерация пучково-плазменных образований в разрядах низкого давления для упрочнения поверхности материалов и изделий / В. В. Денисов, Н. Н. Коваль, Ю. А. Денисова, Е. В. Островерхов // 13-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». – Минск, 2019. – С. 522–525.
10. Генерация низкотемпературной газоразрядной плазмы в больших вакуумных объемах для плазмохимических процессов / Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов, И. В. Лопатин [и др.] // Российский химический журнал. – 2013. – Т. 57. – С. 121–133.
11. Борисов, Д. П. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом / Д. П. Борисов, Н. Н. Коваль, П. М. Щанин // Известия вузов. Физика. – 1994. – Т. 3. – С. 115–120.
12. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда / А. С. Метель,

С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник, В. В. Панин // Физика плазмы. – 2009. – Т. 35, № 12. – С. 1140–1149.

13. Месяц, Г. А. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков / Г. А. Месяц. – Новосибирск: Наука, 1976. – 190 с.

14. Москалев, Б. И. Разряд с полым катодом / Б. И. Москалев. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.

15. Щанин, П. М. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П. М. Щанин. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 145 с.

16. Биберман, Л. М. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы / Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, И. Т. Якубов. – М.: Наука, 1982. – 375 с.

17. Lieberman, V. A. Principles of discharges and materials processing / V. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. – New York: John Wiley Sons, Inc., 1994. – 572 p.

18. Коваль, Н. Н. Генерирование импульсных пучков большого сечения в электронных источниках с сетчатым плазменным эмиттером : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Коваль Николай Николаевич. – Томск, 1984. – 178 с.

19. Толкачев, О. С. Электронные ускорители с эмиттером на основе дугового разряда низкого давления : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Толкачев Валерий Семенович. – Томск, 1988. – 18 с.

20. Меньшаков, А. И. Источник широких электронных пучков на основе разряда с самонакаливаемым полым катодом для азотирования сталей и сплавов : дис. ... канд. техн. наук / Меньшаков Андрей Игоревич. – Екатеринбург, 2013. – 160 с.

21. Гаврилов, Н. В. Источник широких электронных пучков с самонакаливаемым полым катодом для плазменного азотирования нержавеющей стали / Н. В. Гаврилов, А. И. Меньшаков // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 5. – С. 140–148.

22. Гаврилов, Н. В. Влияние параметров электронного пучка и ионного потока на скорость плазменного азотирования нержавеющей стали / Н. В. Гаврилов, А. И. Меньшаков // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 3. – С. 88–93.

23. Гаврилов, Н. В. Экспериментальное исследование условий перехода в сильноточный режим разряда с самонакаливаемым полым катодом из титана в среде азота / Н. В. Гаврилов, А. И. Меньшаков // Письма в журнал технической физики. – 2012. – Т. 38, № 22. – С. 58–64.

24. Гаврилов, Н. В. Низкотемпературное азотирование нержавеющей стали в плазме электронного пучка при 400 °С / Н. В. Гаврилов, А. С. Меньшаков // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – Т. 5. – С. 31–36.

25. Гаврилов, Н. В. Потенциал изолированного электрода в потоке быстрых электронов при давлении газа 0,1–1 Па / Н. В. Гаврилов, А. И. Меньшаков, А. С. Каменецких // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 1. – С. 74–79.

26. Gavrilov, N. V. Low-temperature (400°C) Nitriding of 12Cr18Ni10Ti Steel in Electron-Beam-Generated Plasma / N. V. Gavrilov, F. I. Menshakov // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 80–85.

27. Борисов, Д. П. Генерация однородной газоразрядной плазмы в несамостоятельном разряде низкого давления для модификации поверхности материалов и изделий : дис. ... канд. техн. наук / Борисов Дмитрий Петрович. – Томск, 2015. – 161 с.

28. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов в камере, облучаемой быстрыми электронами / А. С. Метель, С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник, В. В. Прудников // Физика плазмы. – 2011. – Т. 37, № 7. – С. 674–683.

29. Метель, А. С. Особенности установления квазистационарного состояния сильноточного тлеющего разряда с полым катодом при пониженных давлениях газа / А. С. Метель // Журнал технической физики. – 1986. – Т. 56, № 12. – С. 2329–2339.

30. Метель, А. С. Влияние ионизации в катодном слое на характеристики тлеющего разряда с осциллирующими электронами / А. С. Метель // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 55, № 10. – С. 1928–1934.

31. Гречаный, В. Г. Влияние граничных условий на характеристики тлеющего разряда с полым катодом / В. Г. Гречаный, А. С. Метель // Журнал технической физики. – 1982. – Т. 52, № 3. – С. 442–445.

32. Метель, А. С. Расширение рабочего диапазона давлений тлеющего разряда с полым катодом / А. С. Метель // ЖТФ. – 1984. – Т. 54, № 2. – С. 241–247.

33. Самостоятельный тлеющий разряд низкого давления с полым катодом при токах в десятки ампер / И. В. Лопатин, П. М. Щанин, Ю. Х. Ахмадеев, С. С. Ковальский // Физика плазмы. – 2012. – Т. 38, № 7. – С. 639–643.

34. Визирь, А. В. Генерирование широкоапертурных ионных пучков и потоков плазмы на основе тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекции электронов : дис. ... канд. техн. наук / Визирь Алексей Вадимович. – Томск, 2000. – 148 с.

35. Vizir, A. V. Ion beam formation under unusual conditions / A. V. Vizir, E. M. Oks, I. G. Brown // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1998. – Vol. 63. – P. 68–75.

36. Oks, E. M. Low pressure hollow-cathode glow discharge for broad beam gaseous ion source / E. M. Oks, A. V. Vizir, G. Y. Yushkov // Rev. Sci. Instrum. – 1998. – Vol. 69, No 2. – P. 853–855.

37. Vizir, A. V. Further Development of a Gaseous Ion Source Based on Low-Pressure Hollow Cathode Glow / A. V. Vizir, G. Y. Yushkov, E. M. Oks // *Rev. Sci. Instrum.* – 2000. – Vol. 71, No 2. – P. 728–730.

38. Oks E. M., Anders A., Brown I. G. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1996. – Vol. 24, No 3. – P. 1174–1183.

39. Vizir, A. V. Improved bulk plasma uniformity in a discharge system with electron injection / A. V. Vizir, A. V. Tyunkov, M. V. Shandrikov // *10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* – Tomsk, 2010. – P. 41–44.

40. Шандриков, М. В. Генераторы низкотемпературной плазмы на основе разряда низкого давления с инжекцией электронов из дугового контрагированного разряда : дис. ... канд. техн. наук / Шандриков Максим Валентинович. – Томск, 2004. – 146 с.

41. Gaseous Plasma Production Using Electron Emitter Based on Arc Discharge / A. V. Vizir, M. V. Shandrikov, G. Y. Yushkov, E. M. Oks // *In Book Emerging Application of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams.* Edited by Efim Oks and Ian Brown. Kluwe Academic Publishers. – The Netherlands, 2002. – P. 115–122.

42. Генератор объёмной плазмы на основе разряда с плазменным катодом / А. В. Визирь, Е. М. Окс, М. В. Шандриков, Г. Ю. Юшков // *ПТЭ.* – 2003. – Т. 3. – С. 108.

43. Особенности импульсного несамостоятельного тлеющего разряда при большой площади полого катода и высоких значениях тока разряда / В. В. Денисов, Ю. Х. Ахмадеев, Н. Н. Коваль [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2016. – Т. 59, № 7/2. – С. 3–7.

44. Патент № 222962 Российская Федерация. Дуговой генератор газоразрядной плазмы с холодным полым катодом : заявл. 17.06.2002 : опублик. 27.04.2003 / Григорьев С. В., Коваль Н. Н., Щанин П. М.

45. Казьмин, Г. С. Применение плазменного катода с большой эмитирующей поверхностью в импульсном ускорителе с выводом электронов в атмосферу / Г. С. Казьмин, Ю. Е. Крейндель, А. В. Щелоков ; ред. Г.А. Месяц // *Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков.* – Новосибирск: Наука, 1976. – С. 106–112.

46. Генерация однородной низкотемпературной газовой плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большой площади / Ю. Х. Ахмадеев, В. В. Денисов, Н. Н. Коваль [и др.] // *Физика плазмы.* – 2017. – Т. 43, № 1. – С. 63–70.

47. Генерация низкотемпературной газоразрядной плазмы в больших вакуумных объемах для плазмохимических процессов / Н. Н. Коваль,

Ю. Ф. Иванов, И. В. Лопатин [и др.] // Российский химический журнал. – 2013. – Т. 57, № 3-4. – С. 121–133.

48. Денисов, В. В. Генерация низкотемпературной плазмы в сильноточном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом : дис. ... канд. техн. наук / Денисов Владимир Викторович. – Томск, 2018. – 166 с.

49. Ion current density distribution in a pulsed nonself-sustained glow discharge with a large hollow cathode / V. V. Denisov, S. S. Kovalsky, N. N. Koval [et al.] // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – Kazan, 2017. – Vol. 927. – P. 012014.

50. Effect of the mesh emission electrode shape on the distribution of the plasma density generated in the working chamber / E. V. Ostroverkhov, V. V. Denisov, I. V. Lopatin, N. N. Koval // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2108. – Vol. 1115. – P. 032012.

51. Denisova, Y. A. Influence of ion-plasma nitriding on wear-resistance of Cr6VW die steel / Y. A. Denisova, V. V. Denisov, E. V. Ostroverkhov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1115. – P. 032024.

52. Non-self-sustained low-pressure glow discharge for nitriding steels and alloys / E. V. Ostroverkhov, V. V. Denisov, Y. Denisova [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 387. – P. 012056.

53. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом при низких напряжениях горения / В. В. Денисов, Ю. Х. Ахмадеев, Н. Н. Коваль [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика плазмы. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 3–8.

54. Influence of Nitrogen Content in the Working Gas Mixture on the Structure and Properties of the Nitrided Surface of Die Steel / Y. Denisova, V. Denisov, A. Leonov, E. Ostroverkhov // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) – 15th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2020. – P. 522–525.

55. Hung, N. B. Mathematical Modeling of Discharge Plasma Generation and Diffusion Saturation of Metals and Alloys / N. B. Hung, T. V. Koval, M. T. Kim // Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016). – 2016. – Vol. 51. – P. 39–44.

56. Влияние состава плазмообразующего газа на азотирование в несамостоятельном тлеющем разряде с большим полым катодом / Ю. Х. Ахмадеев, И. В. Лопатин, Н. Н. Коваль [и др.] // 10-я Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы. – Томск, 2010. – С. 228–231.

57. Galdikas, A. Modeling of stress induced nitrogen diffusion in nitrided stainless steel / A. Galdikas, T. Moskaliuviene // Surf. Coat. Tech. – 2011. – Vol. 205. – P. 3742–3746.

58. Hosseini, S. R. Calculation and experimentation of the compound layer thickness in gas and plasma nitriding of iron / S. R. Hosseini, F. Ashrafizadeh, A. Kermanpur // *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction.* – 2010. – Vol. B5, No 34. – P. 553–566.

59. Yan, M. Mathematical models and computer simulation of nitrogen concentration profiles in pulse plasma nitride layer / M. Yan, Q. Meng, J. Yan // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2003. – Vol. 1, No 19. – P. 164–166.

60. Modeling surface processes and kinetics of compound layer formation during plasma nitriding of pure iron / F. Cazares, J. A. Ceniceros, O. J. Pena, C. F. Aranguren // *Revista Mexicana de Física.* – 2014. – No 60. – P. 257–268.

61. A diffusion model for coefficient identification during growth of nitrides / J. Bernal, A. Medina, L. Bejar [et al.] // *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences.* – 2011. – Vol. 5, No 2. – P. 395–403.

62. Modeling of nitride layer formation during plasma nitriding of iron / V. I. Dimitrov, J. D. Haen, G. Knuyt [et al.] // *Computation Materials Science.* – 1999. – No 15. – P. 22–34.

63. Экспериментальные исследования и моделирование импульсного электронно-пучкового воздействия на систему «ZrN покрытие/подложка из силумина» / Н. Н. Коваль, Т. В. Коваль, О. В. Крысина [и др.] // *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022).* – Tomsk, 2022. – С. 837–850.

64. Пространственно-временная динамика дуги низкого давления и генерируемого пучка в источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером / М. В. Воробьёв, П. В. Москвин, В. И. Шин [и др.] // *Теплофизика высоких температур.* – 2022. – Т. 60, № 4. – С. 488–495.

65. Отрицательная обратная связь по току в ускоряющем промежутке в источниках электронов с плазменным катодом / М. С. Воробьёв, П. В. Москвин, В. И. Шин [и др.] // *Журнал технической физики.* – 2022. – Т. 92, № 6. – С. 883.

66. Влияние акустических течений на структуру контрагированного тлеющего разряда в аргоне / А. И. Сайфутдинов, С. А. Фадеев, А. А. Сайфутдинова, Н. Ф. Кашапов // *Письма в ЖЭТФ.* – 2015. – Т. 102, № 10. – С. 726–731.

67. Сайфутдинов, А. И. Численное моделирование областей отрицательного свечения и фарадеева темного пространства в тлеющем разряде / А. И. Сайфутдинов, Б. А. Тимеркаев // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева.* – 2011. – Т. 2. – С. 109–114.

68. Сайфутдинов, А. И. Нелокальная модель продольной структуры тлеющего разряда и роль диффузии зарядов вдоль тока / А. И. Сайфутдинов, Б. А. Тимеркаев // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева.* – 2012. – № 2. – С. 188–193.

69. Сайфутдинов, А. И. Управление параметрами тлеющего разряда при низких давлениях с помощью поперечного сверхзвукового потока газа / А. И. Сайфутдинов, Б. А. Тимеркаев, Б. Р. Залялиев // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54, № 5. – С. 669–675.

70. Сайфутдинов, А. И. Особенности переходных процессов в микроарядах постоянного тока в молекулярных газах: от тлеющего разряда в дугу с несвободным или свободным режимом катода / А. И. Сайфутдинов, Б. А. Тимеркаев, А. А. Сайфутдинова // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112, № 7. – С. 443–450.

71. Kashapov, N. F. The model of the positive column of a glow discharge with the influence of the acoustic oscillations / N. F. Kashapov, A. I. Saifutdinov, S. A. Fadeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 567. – P. 012004.

72. Natgasoryan K. Z., Galechyan G. A. // Laser Physics. – 1994. – Vol. 4, No 502.

73. Завершинский, И. П. Плазма в звуковом поле / И. П. Завершинский, Е. Я. Коган // Физика плазмы. – 1994. – Т. 20, № 10. – С. 933–938.

74. Арамян А. Р., Галечян Г. А. Вихри в газоразрядной плазме // УФН. – 2007. – № 177. – С. 1207–1230.

75. Numerical investigation of symmetry breaking and critical behavior of the acoustic streaming field in high-intensity discharge lamps / В. Baumann, J. Schwieger, M. Wolff [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2015. – Vol. 48, No 12. – P. 255501.

76. Особенности генерации однородных газоразрядных пучково-плазменных образований в протяженном полем катоде сильноточного тлеющего разряда / Е. В. Островерхов, В. В. Денисов, Ю. А. Денисова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2022. – Т. 1, № 65. – С. 128–136.

77. Физические особенности формирования плазмы в протяженном полем аноде импульсного несамостоятельного дугового разряда / С. С. Ковальский, В. В. Денисов, Е. В. Островерхов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2022. – Т. 65, № 1. – С. 137–142.

78. Режимы горения несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом при повышенных значениях токов / В. В. Денисов, М. С. Воробьёв, Н. Н. Коваль [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 10/2, № 60. – С. 39–43.

79. Influence of the anode of a non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode on the spatial distribution of plasma concentration / V. V. Denisov, N. N. Koval, E. V. Ostroverkhov [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, No 7. – P. 1147–1153.

80. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда: учеб. руководство / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 592 с.

81. Демидов, В. И. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. / В. И. Демидов, Н. Б. Колоколов, А. А. Кудрявцев. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 235 с.

82. Low-temperature plasma source based on a cold hollow-cathode ARC with increased service life / V. V. Denisov, Y. K. Akhmadeev, N. N. Koval, E. V. Ostroverkhov // High Temperature Material Processes. – 2016. – Vol. 20, No 4. – P. 309–316.

83. The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode / V. V. Denisov, E. V. Ostroverkhov, N. N. Koval [et al.] // Physics of Plasmas. – 2019. – Vol. 26, No 12. – P. 123510.

84. Non-Self-Sustained Hollow-Cathode Glow Discharge at Low Burning Voltages / V. V. Denisov, E. V. Ostroverkhov, N. N. Koval [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, No 4. – P. 563–568.

85. Generation of Plasma with Increased Ionization Degree in a Pulsed High-Current Low-Pressure Hollow Cathode Discharge / V. V. Yakovlev, E. V. Ostroverkhov, N. N. Koval [et al.] // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63, No 10. – P. 1757–1765.

86. Generation of homogeneous gas-discharge beam-plasma formations in an extended hollow-cathode of a high-current glow discharge / E. V. Ostroverkhov, V. V. Denisov, Yu. A. Denisova [et al.] // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65, No 1. – P. 141–149.

87. Pulsed Non-self-sustained Arc Discharge In Extended Hollow Anode / S. S. Kovalsky, V. V. Denisov, E. V. Ostroverkhov [et al.] // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65, No 1. – P. 150–155.

88. Electron-ion-plasma equipment for modification of the surface of materials and products / N. N. Koval, Y. K. Akhmadeev, E. V. Ostroverkhov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, No S2. – P. S294–S300.

89. Ostroverkhov, E. V. Plasma generation in a high-current glow discharge with a hollow cylindrical cathode using two electron sources / E. V. Ostroverkhov, V. V. Denisov, S. S. Kovalsky // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 11, No 65.

90. Koval, T. V. Computer simulation of high-current non-self-sustained glow discharge plasma in hollow cathode at low pressure / T. V. Koval, V. V. Denisov, E. V. Ostroverkhov // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 66, No 10. – P. 1114–1121.

91. Коваль, Т. В. Моделирование сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении / Т. В. Коваль, В. В. Денисов, Е. В. Островерхов // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1, № 2. – С. 30–38.

92. Принцип сложения концентраций заряженных частиц в пучково-плазменном образовании, сформированном в полем катоде несамостоятельного

тлеющего разряда низкого давления / Е. В. Островерхов, Т. В. Коваль, Ю. А. Денисова [и др.] // *Materials. Technologies. Design.* – 2023. – Т. 5, № 5(15). – С. 86–95.

93. Extended Cylindrical Low-Pressure Arc Discharge Plasma Emitter for Generation of a Radially Diverging Electron Beam / S. S. Kovalsky, V. V. Denisov, N. N. Koval, E. V. Ostroverkhov // *Russian Physics Journal.* – 2021. – Vol. 63, No 10. – P. 1735–1742.

94. Модификация поверхности штамповой стали X12МФ в плазме несамостоятельного тлеющего разряда / Ю. А. Денисова, А. А. Леонов, В. В. Денисов, Е. В. Островерхов // *Современные Методы и Технологии Создания и Обработки Материалов: сборник научных трудов. Кн. 2.* – Минск, 2020. – С. 80–87.

95. Generation of Beam-Plasma Formation in a Cylindrical Extended Hollow Grid Anode / T. V. Koval, V. V. Denisov, N. N. Koval [et al.] // *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) – 15th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* – 2020. – P. 666–670.

96. Metel, A. S. Beams of fast neutral atoms and molecules in low-pressure gas-discharge plasma / A. S. Metel // *Plasma Phys. Rep.* – 2012. – Vol. 38. – P. 254–262.

97. McDaniel, E. V. Collision Phenomena in Ionized Gases / E. V. McDaniel. – Wiley, 1964. – 775 p.

98. Resonant recharging processes / E. L. Duman, A. V. Evseev, A. V. Yeletsky [et al.]. – Moscow.: Institute of Atomic Energy im. I.V. Kurchatova, 1979.

99. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда: учеб. руководство для вузов / Ю. П. Райзер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1992. – 536 с.

100. Азотирование стали 30X16 в плазме несамостоятельных разрядов с полым и накаливаемым катодом / Д. Ю. Игнатов, В. В. Денисов, И. В. Лопатин, Е. В. Островерхов // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2016. – Т. 59, № 7/2. – С. 76–80.

101. Азотирование поверхности технически чистого алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / О. В. Крысина, В. В. Денисов, Е. В. Островерхов, О. С. Толкачев // *12-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом».* – Минск, 2017. – С. 250–252.

102. Азотирование титана ВТ1-0 в постоянном и импульсном режимах горения несамостоятельного тлеющего разряда с титановым полым катодом / В. В. Денисов, Ю. Х. Ахмадеев, Ю. А. Денисова [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2017. – Т. 60, № 10/2. – С. 44–48.

103. Денисов, В. В. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом большого объема для азотирования металлов и сплавов / В. В. Денисов,

Е. В. Островерхов // Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сб. тр. Международной научно-технической молодежной конференции. – Томск, 2018. – С. 288–289.

104. Structure and properties of titanium after nitriding in a plasma of pulsed hollow cathode glow discharge / Y. A. Denisova, V. V. Denisov, Y. F. Ivanov [et al.] // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1115. – P. 032025.

105. Nitriding of commercial pure titanium in the plasma of frequency-pulsed non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode / Y. F. Ivanov, A. P. Laskovnev, V. V. Denisov [et al.] // High Temperature Materials Processes. – 2017. – Vol. 21, No 1. – P. 13–23.

106. Pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode for nitriding of iron-based alloys / V. V. Denisov, Y. N. Akhmadeev, I. V. Lopatin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Conference on "Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials", RTERP. – Tomsk, 2014. – P. 012067.

107. Исследование структуры и свойств поверхности штамповой стали 4X5МФС после азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / Ю. А. Денисова, А. А. Леонов, В. В. Денисов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов.– Минск, 2020. – Кн. 2. – С. 41–47.

108. Features of nitriding of the surface of a small-modulus toothed crown in pulsed-periodic gas beam-plasma formation at low pressure / V. V. Denisov, Y. A. Denisova, E. V. Ostroverkhov [et al.] // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 65, No 11. – P. 1832–1836.

109. Influence of the percentage of argon in the ar–n₂ gas mixture on the relative number of ar⁺, n₂⁺, n, and n⁺ particles in the plasma of a non-self-sustained low-pressure glow discharge with a hollow cathode / S. S. Kovalsky, V. V. Denisov, E. V. Ostroverkhov, V. E. Prokop'ev // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 65, No 11. – P. 1867–1874.

110. Deposition of a Multilayer Coating in a Gas-Metal Beam-Plasma Formation at Low Pressure / V. V. Denisov, Yu. A. Denisova, E. L. Vardanyan [et al.] // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64, No 1. – P. 145–150.

Приложение А

Значения концентрации плазмы N , см^{-3}

Таблица А.1

L , мм	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
R , мм	0	$4 \cdot 10^{11}$	$3,72 \cdot 10^{11}$	$3,44 \cdot 10^{11}$	$3,17 \cdot 10^{11}$	$2,89 \cdot 10^{11}$	$2,72 \cdot 10^{11}$	$2,56 \cdot 10^{11}$	$2,39 \cdot 10^{11}$	$2,23 \cdot 10^{11}$	$2,07 \cdot 10^{11}$	$1,92 \cdot 10^{11}$
	32,5	$3,62 \cdot 10^{11}$	$3,45 \cdot 10^{11}$	$3,27 \cdot 10^{11}$	$3,1 \cdot 10^{11}$	$2,93 \cdot 10^{11}$	$2,73 \cdot 10^{11}$	$2,53 \cdot 10^{11}$	$2,33 \cdot 10^{11}$	$2,12 \cdot 10^{11}$	$1,98 \cdot 10^{11}$	$1,84 \cdot 10^{11}$
	65	$3,23 \cdot 10^{11}$	$3,16 \cdot 10^{11}$	$3,09 \cdot 10^{11}$	$3,02 \cdot 10^{11}$	$2,95 \cdot 10^{11}$	$2,72 \cdot 10^{11}$	$2,48 \cdot 10^{11}$	$2,25 \cdot 10^{11}$	$2,01 \cdot 10^{11}$	$1,89 \cdot 10^{11}$	$1,76 \cdot 10^{11}$
	97,5	$2,86 \cdot 10^{11}$	$2,87 \cdot 10^{11}$	$2,89 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^{11}$	$2,91 \cdot 10^{11}$	$2,66 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{11}$	$2,15 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{11}$	$1,78 \cdot 10^{11}$	$1,67 \cdot 10^{11}$
	130	$2,5 \cdot 10^{11}$	$2,57 \cdot 10^{11}$	$2,64 \cdot 10^{11}$	$2,71 \cdot 10^{11}$	$2,78 \cdot 10^{11}$	$2,53 \cdot 10^{11}$	$2,27 \cdot 10^{11}$	$2,02 \cdot 10^{11}$	$1,76 \cdot 10^{11}$	$1,66 \cdot 10^{11}$	$1,55 \cdot 10^{11}$
	162,5	$2,15 \cdot 10^{11}$	$2,25 \cdot 10^{11}$	$2,35 \cdot 10^{11}$	$2,45 \cdot 10^{11}$	$2,55 \cdot 10^{11}$	$2,32 \cdot 10^{11}$	$2,08 \cdot 10^{11}$	$1,85 \cdot 10^{11}$	$1,62 \cdot 10^{11}$	$1,52 \cdot 10^{11}$	$1,42 \cdot 10^{11}$
	195	$1,82 \cdot 10^{11}$	$1,92 \cdot 10^{11}$	$2,03 \cdot 10^{11}$	$2,13 \cdot 10^{11}$	$2,23 \cdot 10^{11}$	$2,04 \cdot 10^{11}$	$1,84 \cdot 10^{11}$	$1,65 \cdot 10^{11}$	$1,46 \cdot 10^{11}$	$1,36 \cdot 10^{11}$	$1,27 \cdot 10^{11}$
	227,5	$1,49 \cdot 10^{11}$	$1,58 \cdot 10^{11}$	$1,67 \cdot 10^{11}$	$1,76 \cdot 10^{11}$	$1,85 \cdot 10^{11}$	$1,71 \cdot 10^{11}$	$1,57 \cdot 10^{11}$	$1,43 \cdot 10^{11}$	$1,29 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$
	260	$1,17 \cdot 10^{11}$	$1,24 \cdot 10^{11}$	$1,31 \cdot 10^{11}$	$1,38 \cdot 10^{11}$	$1,45 \cdot 10^{11}$	$1,36 \cdot 10^{11}$	$1,28 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$	$1,03 \cdot 10^{11}$	$9,39 \cdot 10^{10}$

Окончание таблицы А1

L , мм	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
R , мм	0	$1,76 \cdot 10^{11}$	$1,61 \cdot 10^{11}$	$1,47 \cdot 10^{11}$	$1,33 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$1,05 \cdot 10^{11}$	$8,67 \cdot 10^{10}$	$6,83 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	$3,17 \cdot 10^{10}$
	32,5	$1,7 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{11}$	$1,41 \cdot 10^{11}$	$1,26 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$	$9,66 \cdot 10^{10}$	$8,04 \cdot 10^{10}$	$6,43 \cdot 10^{10}$	$4,81 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{10}$
	65	$1,63 \cdot 10^{11}$	$1,51 \cdot 10^{11}$	$1,35 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$	$8,85 \cdot 10^{10}$	$7,44 \cdot 10^{10}$	$6,04 \cdot 10^{10}$	$4,63 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	97,5	$1,55 \cdot 10^{11}$	$1,44 \cdot 10^{11}$	$1,28 \cdot 10^{11}$	$1,12 \cdot 10^{11}$	$9,66 \cdot 10^{10}$	$8,09 \cdot 10^{10}$	$6,88 \cdot 10^{10}$	$5,66 \cdot 10^{10}$	$4,44 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	130	$1,45 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$	$8,93 \cdot 10^{10}$	$7,43 \cdot 10^{10}$	$6,37 \cdot 10^{10}$	$5,31 \cdot 10^{10}$	$4,25 \cdot 10^{10}$	$3,19 \cdot 10^{10}$
	162,5	$1,32 \cdot 10^{11}$	$1,22 \cdot 10^{11}$	$1,09 \cdot 10^{11}$	$9,56 \cdot 10^{10}$	$8,21 \cdot 10^{10}$	$6,87 \cdot 10^{10}$	$5,93 \cdot 10^{10}$	$4,99 \cdot 10^{10}$	$4,05 \cdot 10^{10}$	$3,11 \cdot 10^{10}$
	195	$1,18 \cdot 10^{11}$	$1,08 \cdot 10^{11}$	$9,72 \cdot 10^{10}$	$8,61 \cdot 10^{10}$	$7,51 \cdot 10^{10}$	$6,41 \cdot 10^{10}$	$5,55 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	$3,85 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$
	227,5	$1,02 \cdot 10^{11}$	$9,26 \cdot 10^{10}$	$8,44 \cdot 10^{10}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$6,81 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$5,21 \cdot 10^{10}$	$4,43 \cdot 10^{10}$	$3,65 \cdot 10^{10}$	$2,87 \cdot 10^{10}$
	260	$8,51 \cdot 10^{10}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$7,12 \cdot 10^{10}$	$6,62 \cdot 10^{10}$	$6,12 \cdot 10^{10}$	$5,62 \cdot 10^{10}$	$4,89 \cdot 10^{10}$	$4,17 \cdot 10^{10}$	$3,45 \cdot 10^{10}$	$2,73 \cdot 10^{10}$

Таблица А.2

$L, \text{ мм}$		0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$R, \text{ мм}$	-260	1,17 · 10¹¹	1,24 · 10 ¹¹	1,31 · 10 ¹¹	1,38 · 10 ¹¹	1,45 · 10¹¹	1,36 · 10 ¹¹	1,28 · 10 ¹¹	1,2 · 10 ¹¹	1,11 · 10¹¹	1,03 · 10 ¹¹	9,39 · 10 ¹⁰
	227,5	1,49 · 10 ¹¹	1,58 · 10 ¹¹	1,67 · 10 ¹¹	1,76 · 10 ¹¹	1,85 · 10 ¹¹	1,71 · 10 ¹¹	1,57 · 10 ¹¹	1,43 · 10 ¹¹	1,29 · 10 ¹¹	1,2 · 10 ¹¹	1,11 · 10 ¹¹
	-195	1,82 · 10 ¹¹	1,92 · 10 ¹¹	2,03 · 10 ¹¹	2,13 · 10 ¹¹	2,23 · 10 ¹¹	2,04 · 10 ¹¹	1,84 · 10 ¹¹	1,65 · 10 ¹¹	1,46 · 10 ¹¹	1,36 · 10 ¹¹	1,27 · 10 ¹¹
	162,5	2,15 · 10 ¹¹	2,25 · 10 ¹¹	2,35 · 10 ¹¹	2,45 · 10 ¹¹	2,55 · 10 ¹¹	2,32 · 10 ¹¹	2,08 · 10 ¹¹	1,85 · 10 ¹¹	1,62 · 10 ¹¹	1,52 · 10 ¹¹	1,42 · 10 ¹¹
	-130	2,5 · 10¹¹	2,57 · 10 ¹¹	2,64 · 10 ¹¹	2,71 · 10 ¹¹	2,78 · 10¹¹	2,53 · 10 ¹¹	2,27 · 10 ¹¹	2,02 · 10 ¹¹	1,76 · 10¹¹	1,66 · 10 ¹¹	1,55 · 10 ¹¹
	97,5	2,86 · 10 ¹¹	2,87 · 10 ¹¹	2,89 · 10 ¹¹	2,9 · 10 ¹¹	2,91 · 10 ¹¹	2,66 · 10 ¹¹	2,4 · 10 ¹¹	2,15 · 10 ¹¹	1,9 · 10 ¹¹	1,78 · 10 ¹¹	1,67 · 10 ¹¹
	-65	3,23 · 10 ¹¹	3,16 · 10 ¹¹	3,09 · 10 ¹¹	3,02 · 10 ¹¹	2,95 · 10 ¹¹	2,72 · 10 ¹¹	2,48 · 10 ¹¹	2,25 · 10 ¹¹	2,01 · 10 ¹¹	1,89 · 10 ¹¹	1,76 · 10 ¹¹
	32,5	3,62 · 10 ¹¹	3,45 · 10 ¹¹	3,27 · 10 ¹¹	3,1 · 10 ¹¹	2,93 · 10 ¹¹	2,73 · 10 ¹¹	2,53 · 10 ¹¹	2,33 · 10 ¹¹	2,12 · 10 ¹¹	1,98 · 10 ¹¹	1,84 · 10 ¹¹
	0	4 · 10¹¹	3,72 · 10 ¹¹	3,44 · 10 ¹¹	3,17 · 10 ¹¹	2,89 · 10¹¹	2,72 · 10 ¹¹	2,56 · 10 ¹¹	2,39 · 10 ¹¹	2,23 · 10¹¹	2,07 · 10 ¹¹	1,92 · 10 ¹¹
	32,5	3,62 · 10 ¹¹	3,45 · 10 ¹¹	3,27 · 10 ¹¹	3,1 · 10 ¹¹	2,93 · 10 ¹¹	2,73 · 10 ¹¹	2,53 · 10 ¹¹	2,33 · 10 ¹¹	2,12 · 10 ¹¹	1,98 · 10 ¹¹	1,84 · 10 ¹¹
	65	3,23 · 10 ¹¹	3,16 · 10 ¹¹	3,09 · 10 ¹¹	3,02 · 10 ¹¹	2,95 · 10 ¹¹	2,72 · 10 ¹¹	2,48 · 10 ¹¹	2,25 · 10 ¹¹	2,01 · 10 ¹¹	1,89 · 10 ¹¹	1,76 · 10 ¹¹
	97,5	2,86 · 10 ¹¹	2,87 · 10 ¹¹	2,89 · 10 ¹¹	2,9 · 10 ¹¹	2,91 · 10 ¹¹	2,66 · 10 ¹¹	2,4 · 10 ¹¹	2,15 · 10 ¹¹	1,9 · 10 ¹¹	1,78 · 10 ¹¹	1,67 · 10 ¹¹
	130	2,5 · 10¹¹	2,57 · 10 ¹¹	2,64 · 10 ¹¹	2,71 · 10 ¹¹	2,78 · 10¹¹	2,53 · 10 ¹¹	2,27 · 10 ¹¹	2,02 · 10 ¹¹	1,76 · 10¹¹	1,66 · 10 ¹¹	1,55 · 10 ¹¹
	162,5	2,15 · 10 ¹¹	2,25 · 10 ¹¹	2,35 · 10 ¹¹	2,45 · 10 ¹¹	2,55 · 10 ¹¹	2,32 · 10 ¹¹	2,08 · 10 ¹¹	1,85 · 10 ¹¹	1,62 · 10 ¹¹	1,52 · 10 ¹¹	1,42 · 10 ¹¹
	195	1,82 · 10 ¹¹	1,92 · 10 ¹¹	2,03 · 10 ¹¹	2,13 · 10 ¹¹	2,23 · 10 ¹¹	2,04 · 10 ¹¹	1,84 · 10 ¹¹	1,65 · 10 ¹¹	1,46 · 10 ¹¹	1,36 · 10 ¹¹	1,27 · 10 ¹¹
	227,5	1,49 · 10 ¹¹	1,58 · 10 ¹¹	1,67 · 10 ¹¹	1,76 · 10 ¹¹	1,85 · 10 ¹¹	1,71 · 10 ¹¹	1,57 · 10 ¹¹	1,43 · 10 ¹¹	1,29 · 10 ¹¹	1,2 · 10 ¹¹	1,11 · 10 ¹¹
260	1,17 · 10¹¹	1,24 · 10 ¹¹	1,31 · 10 ¹¹	1,38 · 10 ¹¹	1,45 · 10¹¹	1,36 · 10 ¹¹	1,28 · 10 ¹¹	1,2 · 10 ¹¹	1,11 · 10¹¹	1,03 · 10 ¹¹	9,39 · 10 ¹⁰	

Окончание таблицы А.2

L, мм		550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
R, мм	-260	$8,51 \cdot 10^{10}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$7,12 \cdot 10^{10}$	$6,62 \cdot 10^{10}$	$6,12 \cdot 10^{10}$	$5,62 \cdot 10^{10}$	$4,89 \cdot 10^{10}$	$4,17 \cdot 10^{10}$	$3,45 \cdot 10^{10}$	$2,73 \cdot 10^{10}$
	227,5	$1,02 \cdot 10^{11}$	$9,26 \cdot 10^{10}$	$8,44 \cdot 10^{10}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$6,81 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$5,21 \cdot 10^{10}$	$4,43 \cdot 10^{10}$	$3,65 \cdot 10^{10}$	$2,87 \cdot 10^{10}$
	-195	$1,18 \cdot 10^{11}$	$1,08 \cdot 10^{11}$	$9,72 \cdot 10^{10}$	$8,61 \cdot 10^{10}$	$7,51 \cdot 10^{10}$	$6,41 \cdot 10^{10}$	$5,55 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	$3,85 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$
	162,5	$1,32 \cdot 10^{11}$	$1,22 \cdot 10^{11}$	$1,09 \cdot 10^{11}$	$9,56 \cdot 10^{10}$	$8,21 \cdot 10^{10}$	$6,87 \cdot 10^{10}$	$5,93 \cdot 10^{10}$	$4,99 \cdot 10^{10}$	$4,05 \cdot 10^{10}$	$3,11 \cdot 10^{10}$
	-130	$1,45 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$	$8,93 \cdot 10^{10}$	$7,43 \cdot 10^{10}$	$6,37 \cdot 10^{10}$	$5,31 \cdot 10^{10}$	$4,25 \cdot 10^{10}$	$3,19 \cdot 10^{10}$
	97,5	$1,55 \cdot 10^{11}$	$1,44 \cdot 10^{11}$	$1,28 \cdot 10^{11}$	$1,12 \cdot 10^{11}$	$9,66 \cdot 10^{10}$	$8,09 \cdot 10^{10}$	$6,88 \cdot 10^{10}$	$5,66 \cdot 10^{10}$	$4,44 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	-65	$1,63 \cdot 10^{11}$	$1,51 \cdot 10^{11}$	$1,35 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$	$8,85 \cdot 10^{10}$	$7,44 \cdot 10^{10}$	$6,04 \cdot 10^{10}$	$4,63 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	32,5	$1,7 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{11}$	$1,41 \cdot 10^{11}$	$1,26 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$	$9,66 \cdot 10^{10}$	$8,04 \cdot 10^{10}$	$6,43 \cdot 10^{10}$	$4,81 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{10}$
	0	$1,76 \cdot 10^{11}$	$1,61 \cdot 10^{11}$	$1,47 \cdot 10^{11}$	$1,33 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$1,05 \cdot 10^{11}$	$8,67 \cdot 10^{10}$	$6,83 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	$3,17 \cdot 10^{10}$
	32,5	$1,7 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{11}$	$1,41 \cdot 10^{11}$	$1,26 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$	$9,66 \cdot 10^{10}$	$8,04 \cdot 10^{10}$	$6,43 \cdot 10^{10}$	$4,81 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{10}$
	65	$1,63 \cdot 10^{11}$	$1,51 \cdot 10^{11}$	$1,35 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$	$8,85 \cdot 10^{10}$	$7,44 \cdot 10^{10}$	$6,04 \cdot 10^{10}$	$4,63 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	97,5	$1,55 \cdot 10^{11}$	$1,44 \cdot 10^{11}$	$1,28 \cdot 10^{11}$	$1,12 \cdot 10^{11}$	$9,66 \cdot 10^{10}$	$8,09 \cdot 10^{10}$	$6,88 \cdot 10^{10}$	$5,66 \cdot 10^{10}$	$4,44 \cdot 10^{10}$	$3,22 \cdot 10^{10}$
	130	$1,45 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$	$8,93 \cdot 10^{10}$	$7,43 \cdot 10^{10}$	$6,37 \cdot 10^{10}$	$5,31 \cdot 10^{10}$	$4,25 \cdot 10^{10}$	$3,19 \cdot 10^{10}$
	162,5	$1,32 \cdot 10^{11}$	$1,22 \cdot 10^{11}$	$1,09 \cdot 10^{11}$	$9,56 \cdot 10^{10}$	$8,21 \cdot 10^{10}$	$6,87 \cdot 10^{10}$	$5,93 \cdot 10^{10}$	$4,99 \cdot 10^{10}$	$4,05 \cdot 10^{10}$	$3,11 \cdot 10^{10}$
	195	$1,18 \cdot 10^{11}$	$1,08 \cdot 10^{11}$	$9,72 \cdot 10^{10}$	$8,61 \cdot 10^{10}$	$7,51 \cdot 10^{10}$	$6,41 \cdot 10^{10}$	$5,55 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	$3,85 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$
	227,5	$1,02 \cdot 10^{11}$	$9,26 \cdot 10^{10}$	$8,44 \cdot 10^{10}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$6,81 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$5,21 \cdot 10^{10}$	$4,43 \cdot 10^{10}$	$3,65 \cdot 10^{10}$	$2,87 \cdot 10^{10}$
260	$8,51 \cdot 10^{10}$	$7,63 \cdot 10^{10}$	$7,12 \cdot 10^{10}$	$6,62 \cdot 10^{10}$	$6,12 \cdot 10^{10}$	$5,62 \cdot 10^{10}$	$4,89 \cdot 10^{10}$	$4,17 \cdot 10^{10}$	$3,45 \cdot 10^{10}$	$2,73 \cdot 10^{10}$	

Приложение Б

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ОП АО «НПО «Курганприбор»

в г. Новосибирске – Сибтекстильмаш

В.И. Девяткин

2024 г



АКТ

о внедрении результатов научных исследований
в рамках диссертационной работы Островерхова Евгения Владимировича

Научные результаты диссертационной работы Островерхова Евгения Владимировича внедрены в ОП АО «НПО «Курганприбор» в г. Новосибирске – Сибтекстильмаш» в виде типовых технологических процессов упрочнения поверхности вытяжных пуансонов разной номенклатуры для изделий 4Ж40 и 4Г5 из стали марки Х12МФ методом ионно-плазменного азотирования в объемно-однородных газовых пучково-плазменных образованиях.

Разработанный технологический процесс реализован на ионно-плазменных установках генерации газовых ППО и позволяет проводить очистку и активацию поверхности штампового инструмента в аргоновой газовой плазме, осуществлять нагрев изделия до требуемой температуры и азотировать поверхность на требуемую глубину (0,05-0,15) мм. Разработанные режимы позволяют в процессе ионно-плазменного азотирования сохранить требуемую прочность пуансона в объеме материала.

Результаты комплексных исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, позволили получить совокупность экспериментальных данных о влиянии технологических режимов ионно-плазменного азотирования на износостойкость поверхности пуансонов разной номенклатуры из стали марки Х12МФ, геометрию пуансона и твердость инструмента в объеме материала.

Производственные испытания показали, что разработанные режимы ионно-плазменного азотирования позволили повысить срок службы пуансонов разной номенклатуры из стали марки Х12МФ, не менее 2 раз.

Заместитель директора

В.Н. Ярошук

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Проект-Р»Г.В. Намруев
2024 г

АКТ

о внедрении результатов научных исследований
в рамках диссертационной работы Островерхова Евгения Владимировича

Научные результаты диссертационной работы Островерхова Евгения Владимировича внедрены в ООО «Проект-Р» в виде типовых технологических процессивно-ионно-плазменного азотирования вытяжных пуансонов КА8100, КА7902, КА8402 из стали марки 1.2379 в газовых пучково-плазменных образованиях.

Разработанные технологические процессы позволяют проводить последовательно очистку и активацию поверхности штампового инструмента, нагрев изделия до требуемой температуры и ионно-плазменное азотирование на глубину 0,1 мм в газовом пучково-плазменном образовании. Технологические процессы обеспечивают сохранение в процессе обработки требуемой прочности пуансонов в объеме материала.

Производственные испытания показали, что разработанные технологические процессы позволяют обеспечить требуемый срок службы пуансонов КА8100, КА7902, КА8402 из стали марки 1.2379.

Главный инженер

Р.И. Баянов

Приложение В

Описание изобретения к патенту

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 686 975** (13) **C1**(51) МПК
C23C 8/36(2006.01)
C23C 14/24(2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C23C 8/36 (2018.08); C23C 14/24 (2018.08)

(21) (22) Заявка: 2018110745, 26.03.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.03.2018Дата регистрации:
06.05.2019Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 26.03.2018

(45) Опубликовано: 06.05.2019 Бюл. № 13

Адрес для переписки:
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3,
Институт сильноточной электроники СО РАН,
зам. директора по НР ИСЭ СО РАН Хузееву
А.П.

(72) Автор(ы):
Денисов Владимир Викторович (RU),
Коваль Николай Николаевич (RU),
Щанин Петр Максимович (RU),
Островерхов Евгений Владимирович (RU),
Денисова Юлия Александровна (RU),
Иванов Юрий Федорович (RU),
Ахмадеев Юрий Халяфович (RU),
Лопатин Илья Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт сильноточной
электроники Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
(RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Коваль Н.Н. и др. Влияние состава
плазмообразующего газа на процесс
азотирования в самостоятельном
тлеющем разряде с полым катодом
большого размера. Поверхность.
Рентгеновские, синхротронные и
нейтронные исследования, 2012, N2, с.62-67.
RU 2464355 C1, 20.10.2012. RU 2596554 C1,
10.09.2016. RU 2413033 C2, 27.02.2011. US
3108900 A, 29.10.1963.

(54) Способ ионно-плазменного азотирования изделий из титана или титанового сплава

(57) Реферат:

Изобретение относится к упрочнению поверхности изделий из титана и титановых сплавов путем ионно-плазменного азотирования и может быть использовано в авиакосмической отрасли, машиностроении, медицине и других отраслях. В вакуумную камеру напускают азот или азотсодержащую смесь газов, в рабочий объем камеры инжектируют электроны, зажигают тлеющий разряд между полым катодом и анодом и генерируют плазму. На обрабатываемые изделия подают отрицательное относительно анода напряжение, затем проводят очистку и

нагрев поверхности изделий за счет ионной бомбардировки положительно заряженными ионами и последующее азотирование в плазме тлеющего разряда. Генерацию плазмы осуществляют в частотно-импульсном тлеющем разряде при частоте следования импульсов 1 Гц - 100 кГц с коэффициентом заполнения импульсов разрядного тока 10-90 % при давлении 0,1-10 Па. Изделие азотируют при средней плотности тока ионов из плазмы 1-15 мА/см² и при импульсной плотности тока ионов 5-100 мА/см² в нагретом

RU 2 686 975 C 1

RU 2 686 975 C 1